

Methoden zur Untersuchung der lokalen Gemisch- zusammensetzung im DI-Ottomotor

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Maschinenbau der
Universität Duisburg-Essen
zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTOR-INGENIEUR

genehmigte Dissertation

von

Felix Kallmeyer
aus
Kiel

Referent: Prof. Dr. rer. nat. Christof Schulz
Korreferent: Prof. Dr. rer. nat. Volker Ebert
Tag der mündlichen Prüfung: 07. Juli 2009

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand in der Abteilung für Messtechnik der Volkswagen AG. Mein Dank gilt Dr. Bernd Stoffregen, der es mir ermöglicht hat, diese interessante Arbeit in seiner Abteilung durchzuführen.

Für die wissenschaftliche Betreuung und Förderung der Arbeit sowie für die Übernahme des Hauptreferats danke ich besonders Prof. Dr. Christof Schulz, dem Leiter des Instituts für Verbrennung und Gasdynamik der Universität Duisburg-Essen.

Ebenso gilt mein dank Prof. Dr. Volker Ebert für die Übernahme des Koreferates.

Herzlich bedanken möchte ich mich bei Dr. Werner Hentschel und Dr. Stefan Dankers, die mir in zahlreichen Diskussionen stets als kompetente Ansprechpartner zur Seite standen und deren Anregungen und intensive Unterstützung maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein Dank gebührt auch Thomas Berg und Dr. Olaf Thiele von LaVision sowie Dr. Volker Beushausen und Alexander Grosch vom Laser-Laboratorium-Göttingen für die äußerst konstruktive Zusammenarbeit im Rahmen des niedersächsischen Förderprojektes „Mimose“. Ferner danke ich meinen Kollegen Guido Grosse und Norbert Dukiewitz für die Unterstützung bei der Durchführung der Versuche auf den Motorenprüfständen der Audi AG und der Volkswagen AG.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meiner Frau und meiner Familie bedanken, die mich fortwährend unterstützt und motiviert haben.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Ottomotorische Gemischbildung	5
2.1	Ottomotor mit Saugrohreinspritzung	6
2.2	Allgemeine Grundlagen der Benzin-Direkt-Einspritzung (BDE)	6
2.3	Das Volkswagen FSI-Brennverfahren	10
3	Methoden zur Analyse der lokalen Gemischverteilung und Gemischzusammensetzung	13
3.1	Laserinduzierte Fluoreszenz (LIF)	15
3.1.1	Zwei-Niveau Modell	15
3.1.2	Lineare LIF	18
3.1.3	Sättigungs-LIF	18
3.1.4	LIF an Real-Kraftstoffen unter motorischen Bedingungen	19
3.2	Absorptionsspektroskopie	19
3.2.1	Theoretische Grundlagen	20
3.2.2	Umgang mit Störgrößen bei Messungen im Brennraum	21
3.2.3	Spektrale Überlappung des Absorptionsspektrums mit dem Detektionsspektrum	22
4	Gemischbildungsanalyse mittel LIF	25
4.1	Lichtquellen und Kameras	27
4.2	Optisch zugängliche Motoren	28
4.2.1	Transparentmotor / Glasringmotor	28
4.2.2	Brillenmotor	29
4.3	LIF durch minimierte optische Zugänge	29
4.3.1	Motor30	
4.3.2	UV-Endoskop	31
4.3.3	LIF-Messsystem	33
4.3.4	Versuchsaufbau und Betriebspunkte LIF-Detektion von Realkraftstoff mittels Endoskop	35

4.3.5	Versuchsaufbau LIF-Detektion von Realkraftstoff mittels Objektiv und Zerstreuungslinse.....	37
4.3.6	Ergebnisse LIF-Detektion von Realkraftstoff mittels Endoskop.....	39
4.3.7	Ergebnisse LIF durch minimierten optischen Zugang mittels Zerstreuungslinse.....	46
4.4	LIF mit optimierter Bildfolgerate.....	49
4.4.1	Beschreibung der HS-LIF-Systemkomponenten und experimenteller Aufbau.....	50
4.4.2	Betriebspunkte und Durchführung.....	54
4.4.3	Vergleich Kraftstoff-LIF mit High-Speed-LIF (HS-LIF).....	56
4.4.4	Vergleich HS-Streulicht – HS-LIF.....	59
5	Gemischbildungsanalyse mittels Absorptionsspektroskopie.....	61
5.1	Infrarotabsorptionssensor ohne Zündfunktion.....	62
5.1.1	Motorische Randbedingungen.....	62
5.1.2	Systemkomponenten und experimenteller Aufbau.....	63
5.1.3	Datenauswertung.....	65
5.1.4	Näherungsverfahren zur Lambdabestimmung, Druck- und Temperaturkorrektur.....	68
5.1.5	Kalibration.....	71
5.1.6	Näherungsverfahren zur Lambdabestimmung, Berechnung des Brennraumvolumens.....	72
5.1.7	Motorische Ergebnisse des MIR-Sensor ohne Zündkerzenfunktion.....	74
5.1.8	Lambdaverläufe im Homogenbetrieb.....	76
5.1.9	Lambdaverläufe im Schichtbetrieb.....	79
5.2	Infrarotabsorptionssensor mit Zündfunktion.....	87
5.2.1	Aufbau des Messsystems.....	87
5.2.2	Motorische Parameter.....	89
5.2.3	Versuchsdurchführung.....	91
5.2.4	Näherungsverfahren zur Lambdabestimmung im gefeuerten Betrieb.....	92
5.2.5	Homogenbetrieb (FSI).....	103
5.2.6	Schichtbetrieb (FSI).....	114
5.2.7	Homogenbetrieb mit Saugrohreinspritzung (MPI).....	119

5.2.8	Homogenbetrieb 4-Zylinder FSI®-Serienmotor.....	121
5.3	Fehlerbetrachtung	124
5.3.1	Fehlerquellen bei der Bestimmung der Absorption	124
5.3.2	Genauigkeit der Referenzmessung.....	126
5.3.3	Fehler bei der Lambdaberechnung mittels Kalibrierkurve	127
6	Diskussion der Ergebnisse	129
7	Zusammenfassung und Ausblick	137
8	Formelzeichen und Abkürzungen	141
9	Literatur	145
10	Anhang	151

1 Einleitung

Die Entwicklung des Ottomotors ist eine mittlerweile fast 130 Jahre andauernde Erfolgsgeschichte. 1876 wurde der nach seinem Erfinder, Nikolaus Otto, benannte Motor erstmals der Öffentlichkeit vorgestellt. Die Erfindung basierte auf dem neun Jahre zuvor vorgestellten Gasmotor von Etienne Lenoir und unterschied sich durch das erstmals umgesetzte Viertakt-Prinzip.

Obwohl während der seither andauernden Entwicklung des Ottomotors alle grundlegenden Komponenten zur Zündung, Gemischbildung oder Ventilsteuerung massiven Veränderungen unterlegen waren, ist das Grundprinzip der vier Takte, bestehend aus Ansaugen, Verdichten, Expansion und Ausstoßen nach wie vor unverändert.

Heutzutage sind Ottomotoren in einer Vielzahl unterschiedlichster Anwendungen zu finden. Zu den am weitesten verbreiteten Verwendungen gehört der Einsatz als Antriebsquelle in Kraftfahrzeugen. Die Anforderungen an einen PKW-Motor sind dabei sehr vielschichtig. Neben hoher Leistung bei niedrigem Gewicht und geringen äußeren Abmessungen sowie einer dem Straßenverkehr angepassten Regelbarkeit sind heute vor allem geringe umweltrelevante Emissionen, ein geringer Kraftstoffverbrauch und niedrige Herstellungskosten gefordert. Die Erfüllung all dieser Aufgaben kann zum aktuellen Zeitpunkt in der Großserienproduktion fast ausschließlich durch Otto- oder Dieselmotoren geleistet werden.

Ein gesteigertes Umweltbewusstsein, das Wissen um die endliche Verfügbarkeit fossiler Kraftstoffe als Energiequelle und die Bestrebung von Seiten der Politik, den CO₂-Ausstoss von Herstellerflotten zukünftig zu limitieren bzw. mit Strafsteuern zu versehen, haben dazu geführt, dass das Ziel der Automobilindustrie, die Flottenkraftstoffverbräuche zu senken, momentan mit großer Priorität verfolgt wird. Die Anstrengungen hinsichtlich der Entwicklung alternativer Antriebsformen wurden seitdem erheblich verstärkt, allerdings ist die Euphorie auf einen schnellen und breiten Serieneinsatz von CO₂-neutraler Brennstoffzellentechnik mit Wasserstoff als Energiequelle bzw. Elektrofahrzeugen durch die noch zu überwindenden technologischen Schwierigkeiten der Ernüchterung gewichen. Kurzfristig sind diese Ziele somit nur durch die konsequente Verbesserung der bestehenden Motorentechnik zu erreichen.

Die Einführung der Diesel-Direkteinspritzung für PKW-Motoren im Jahr 1990 hat zu einer sprunghaften Reduzierung des Verbrauchs geführt. Durch zunehmend strengere Emissionsvorschriften für Kraftfahrzeuge im gleichen Zeitraum, kann die Einhaltung dieser Grenzwerte nur noch mittels spezieller Maßnahmen zur Abgasnachbehandlung erreicht werden, die sich negativ auf den Verbrauch auswirken.

Der Ottomotor mit nachgeschaltetem Drei-Wege-Katalysator weist gegenüber dem Dieselmotor Emissionsvorteile auf, die auch die Einhaltung zukünftiger Grenzwerte ermöglicht, allerdings geht dies mit Verbrauchsnachteilen einher. Diese sind zum Teil auf die Drosselverluste im Teillastbetrieb sowie auf das geringere Verdichtungsverhältnis zurückzuführen.

Ein Ansatz, diese Verluste zu verringern, ist die Benzin-Direkt-Einspritzung (BDE) bei Volkswagen auch FSI®-Technologie genannt. Im Gegensatz zu konventionellen Otto-Motoren findet die

Gemischbildung nicht im Saugrohr oder den Einlasskanälen statt, sondern unmittelbar im Brennraum. Neben dem so genannten Homogenbetrieb, in dem der Motor quantitativ geregelt, das heißt durch die Gemischmenge geregelt wird, lässt sich auch der qualitativ geregelte so genannte Schichtbetrieb realisieren, in dem die Gemischzusammensetzung verändert wird. Kernpunkt dieses Brennverfahrens ist eine Ladungsschichtung im Brennraum, bei der eine Wolke zündfähigen Luft-Kraftstoff-Gemisches von Luft bzw. Restgas umgeben ist. Auf diese Weise kann der Motor entdrosselt mit einem global mageren Gemisch betrieben werden, während die Zündfähigkeit durch eine lokale Gemischwolke an der Zündkerze sichergestellt wird.

Die Steuerung dieses Prozesses ist im Vergleich zum konventionellen homogenen Brennverfahren durch die Erhöhung der Freiheitsgrade in der Motorsteuerung deutlich komplexer. Eine erfolgreiche Zündung des Gemisches im stationären Schichtbetrieb ist im Wesentlichen das Zusammenspiel von den aus homogenen Brennverfahren bekannten Parametern Einspritzzeitpunkt, Einspritzdauer und Drosselklappenstellung sowie den zusätzlichen Freiheitsgraden Einspritzdruck, Stellung der Luftleitklappen, Kolbengeometrie und Zündzeitpunkt. Insbesondere das Luft-Kraftstoff-Verhältnis und seine zeitliche Entwicklung haben dabei großen Einfluss auf die Stabilität des Brennverfahrens und die motorischen Rohemissionen bei der Verbrennung [1]. Aufgrund dieser gesteigerten Komplexität ist man bei der Brennverfahrenentwicklung auf über die Motorindizierung hinaus gehende Hilfsmittel angewiesen. Die Motorzyklus-individuelle Analyse der Gemischbildungsphänomene im Brennraum ist daher ein wichtiges Mittel, um zukünftige Brennverfahren zu entwickeln.

Optische Messverfahren in Verbindung mit optisch zugänglichen Motoren haben sich als Ziel führendes Mittel zur systematischen Untersuchung der Gemischbildungsprozesse erwiesen und werden seit über 80 Jahren zur Entwicklung von Verbrennungsmotoren eingesetzt¹. Hochgeschwindigkeits-Kinematografie ermöglicht dem Entwickler die qualitative Beurteilung des Einspritzverlaufs und der Flammenausbreitung, mittels Particle-Image-Velocimetry (PIV) ist man in der Lage, die Luftströmung zu visualisieren und Messverfahren nach dem Prinzip der Laser-induzierten Fluoreszenz (LIF) dienen zur Analyse der Kraftstoffverteilung sowohl in der Flüssig- als auch in der Dampfphase. Die Kombination dieser Verfahren in Verbindung mit der Standardmesstechnik ergibt ein geschlossenes Bild der Abläufe und sorgt für ein grundlegendes Verständnis der Gemischbildungsprozesse.

Sämtliche eben genannte Messtechniken benötigen einen oder mehrere große optische Zugänge zum Brennraum. Diese wurden bislang durch so genannte Transparent- oder Glasringmotor-konzepte realisiert, bei denen Teile des Brennraums oder des Kolbens aus Glas gefertigt werden. Die unterschiedlichen Materialeigenschaften von Glas und Metall und die benötigten größeren Bauteiltoleranzen beeinflussen die thermodynamischen Eigenschaften der optischen Moto-

¹ Spicher et al. geben in [2] einen historischen Überblick über die optische Messtechnik in Verbrennungsmotoren

ren und beschränken den Betriebsbereich in der Regel auf niedrige Drehzahlen und Lasten.

In dieser Arbeit werden mehrere Konzepte zum Einsatz optischer Messtechnik durch minimierte Zugänge zum Brennraum vorgestellt. Es werden qualitative LIF-Untersuchungen im geschleppten und gefeuerten Motorbetrieb an einem seriennahen 4-Zylinder Ottomotor durchgeführt. Dabei kommen sowohl ein speziell auf den UV-Bereich optimiertes Endoskop wie auch ein UV-Objektiv mit einer zusätzlichen brennraumnahen Zerstreuungslinse zum Einsatz. Die beiden Verfahren werden hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit bei der Visualisierung von Gemischbildungsphänomenen im Homogenbetrieb und im Schichtbetrieb miteinander verglichen.

Weitere LIF-Untersuchungen befassen sich mit der Realisierung von zeitlich hoch aufgelösten Messungen zur Visualisierung der Gemischbildung innerhalb eines Motorzyklus. Hierzu wird dem Kraftstoff (Eurosuper) Rhodamin als Tracer beigefügt und mittels eines hoch repetierenden Nd:YLF-Lasers zur Fluoreszenz angeregt. Parallel aufgezeichnete Standard-LIF-Bilder dienen als Referenz bei der Beurteilung der Ergebnisse.

Ein großer Teil der Arbeit befasst sich mit der Entwicklung und Beurteilung eines Verfahrens zur Bestimmung der lokalen Kraftstoffkonzentration in der Nähe der Zündkerze. Hierbei kommt der im Rahmen des vom Land Niedersachsen geförderten Projektes „Miniaturisierte Motorische Sensorik“ (kurz: „Mimose“) entwickelte Sensor zur Bestimmung der lokalen Kraftstoffkonzentration in Zündfunkennähe zum Einsatz. Dieser ist in der Lage, mehrere Motorzyklen in Folge kurbelwinkelaufgelöste Messungen der Absorption von infrarotem Licht durch Kraftstoff zu detektieren. In einer ersten Ausbaustufe wird dieser zunächst im Schleppbetrieb eingesetzt, und eine Auswertestrategie zur Abschätzung von Lambdaverläufen aus den gemessenen Absorptionsverläufen wird vorgestellt. In einer zweiten Ausbaustufe werden die für eine Erweiterung auf den gefeuerten Betrieb notwendigen Schritte und die entsprechenden Anpassungen der Hardware und der Auswerteroutinen erläutert. Anschließend werden Ergebnisse aus motorischen Untersuchungen unter Variation der Ansaugluftführung, der Einspritzparameter sowie der Gemischbildung (innere und äußere) diskutiert. Hierbei werden sowohl gemittelte Verläufe als auch Einzelzyklen analysiert. Abschließend erfolgen die Präsentation von Ergebnissen aus Anwendungen an einem Serienmotor sowie die Beurteilung der Messgenauigkeit und die Bedeutung für den Einsatz als Serienwerkzeug in der Brennverfahrenentwicklung.

2 Ottomotorische Gemischbildung

Die Abbildung 2.1 zeigt den Durchschnittsverbrauch neuer Fahrzeuge aus deutscher Produktion der letzten 30 Jahre. Seit einem kurzen Anstieg des Durchschnittsverbrauchs durch die flächen-deckende Einführung des 3-Wege-Katalysators Mitte der achtziger Jahre weist die Kurve durch die ständige Weiterentwicklung der Otto- und Dieselmotoren einen stetigen Abwärtstrend auf.

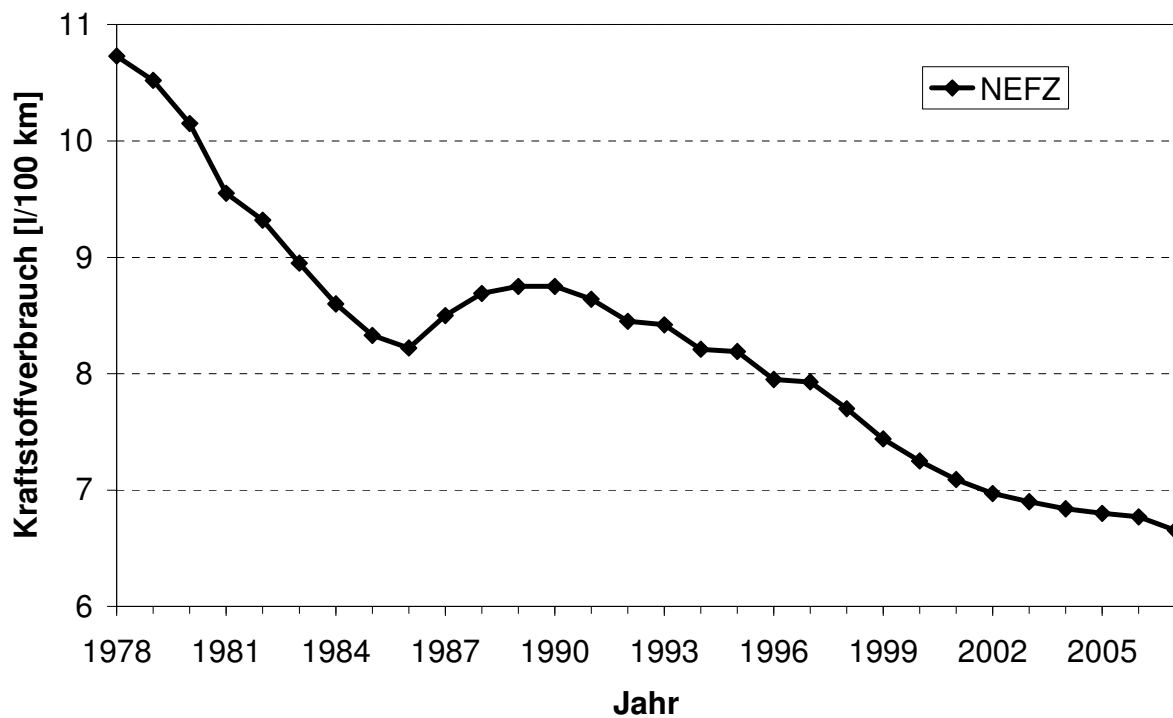


Abbildung 2.1: durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch nach NEFZ (Neuer Europäischer Fahrzyklus), Neufahrzeuge aus deutscher Produktion [3]

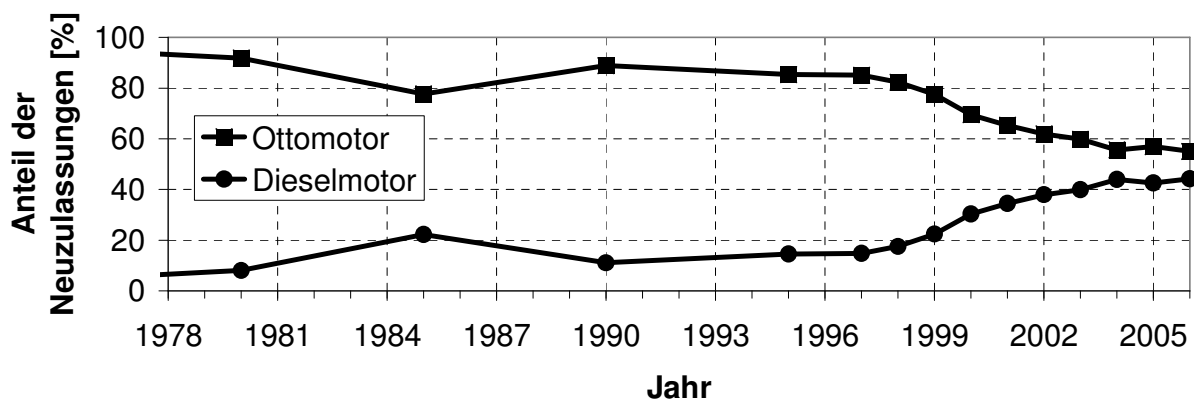


Abbildung 2.2: Anteil der Neuzulassungen Otto- / Dieselmotor in Deutschland [4]

Ein großer Anteil der seit 1990 erzielten Verbrauchsreduzierung ist auf die Einführung der Die-

sel-Direkteinspritzung im PKW Bereich zurückzuführen. Neben Verbrauchsvorteilen von ca. 15% gegenüber Wirbelkammer-Dieselmotoren [5] hat besonders die Drehmomentsteigerung von bis zu 100% zu einer breiten Akzeptanz beim Automobilkunden geführt. Dies spiegelt sich in den Marktanteilen des Dieselmotors wieder, der im gleichen Zeitraum von 11% auf über 44% zugenommen hat (siehe Abbildung 2.2).

Die Einhaltung der durch die Abgasgesetzgebung vorgeschriebenen Grenzwerte wird zunehmend schwieriger. Bereits heute werden die durch die Weiterentwicklung der Brennverfahren erzielbaren Verbrauchsvorteile durch innermotorisch wie außermotorische Maßnahmen zur Verbesserung der Abgasqualität sowie durch steigende Fahrzeuggewichte aufgezehrt. Im Jahr 2012 tritt das EU-Emissionsgesetz in Kraft, das für den Flottenverbrauch der Fahrzeughersteller einen Grenzwert von 120 g CO₂/km vorgibt. Um dieses Ziel zu erreichen, bedarf es folglich auch der konsequenten Ausnutzung aller Potentiale zur Verbrauchsreduzierung des Ottomotors.

2.1 Ottomotor mit Saugrohreinspritzung

Konventionelle Ottomotoren werden mit äußerer Gemischbildung betrieben. Die Durchmischung des eingespritzten, verdampfenden Kraftstoffes und der benötigten Luft erfolgt im Saugrohr außerhalb des Brennraumes. Während der Ansaugphase wird das Kraftstoff-Luftgemisch über das Einlassventil in den Brennraum angesaugt. Die Lastregelung erfolgt quantitativ über die zugeführte Frischgasmenge. Hierzu kann das Druckgefälle zwischen Saugrohr und Brennraum über die Drosselklappe gesteuert werden. In weiten Bereichen des Betriebskennfeldes ist die Gemischzusammensetzung konstant und entspricht dem Verhältnis für eine stöchiometrische Verbrennung ($\lambda = 1$). Die Kennziffer λ ist dabei definiert als das Verhältnis aus der tatsächlich vorhandenen Frischluftmenge m_L und der für eine vollständige Verbrennung theoretisch benötigten Menge $m_{L,th}$.

$$\lambda = \frac{m_L}{m_{L,th}} \quad (2.1)$$

Bei einem Luftüberschuss ($\lambda > 1$) spricht man von mageren, bei Luftmangel ($\lambda < 1$) von fetten Gemischen.

In weiten Bereichen des Betriebskennfeldes werden konventionelle Ottomotoren mit stöchiometrischen Gemischen betrieben. Erst mit dem Erreichen der Volllast wird das Gemisch in der Regel weiter angefettet, da die Brenngeschwindigkeiten für fette Gemische zunehmen [6] und die Verdampfungsenthalpie des zusätzlich eingebrachten Kraftstoffes für eine Absenkung der Spitzentemperaturen sorgt. Beide Effekte bewirken eine Verminderung des Bauteilschädigenden Klopfens.

2.2 Allgemeine Grundlagen der Benzin-Direkt-Einspritzung (BDE)

Einen wesentlichen Beitrag zur Absenkung der Durchschnittsverbrauchswerte kann die Benzin-Direkt-Einspritzung leisten. Ihre Wirkungsgradvorteile lassen sich im Wesentlichen auf die Vermeidung von Drosselverlusten sowie aus der Verringerung der Wandwärmeverluste zurückführen.

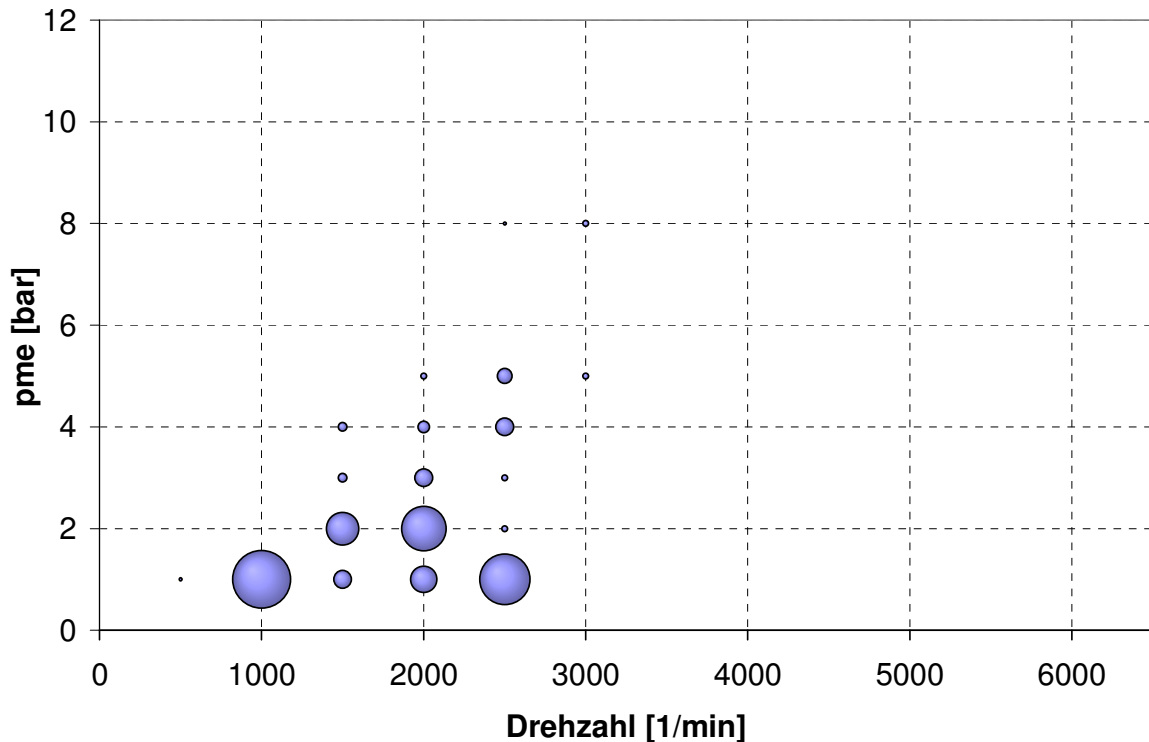


Abbildung 2.3: Betriebspunkte des MVEG-Fahrzyklus im Lastkennfeld eines Ottomotors in einem Fahrzeug der unteren Mittelklasse

Die Abbildung 2.3 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Betriebspunkte im Lastkennfeld eines 4 Zylinder-Ottomotors während des MVEG-Fahrzyklus. Die Verweildauer im Kennfeldpunkt wird durch die Größe der Blasen dargestellt. Die relevanten Betriebspunkte beschränken sich zu großen Teilen auf die Teillast sowie den Leerlauf, der in der Abbildung mit dem Lastpunkt 1000 min^{-1} und 1 bar Mitteldruck (pme) zusammengefasst ist. Hier sind die Verluste des konventionellen Ottomotors durch seine Quantitätsregelung gegenüber dem qualitätsgeregelten Dieselmotor besonders groß. Eine Qualitätsregelung des Ottomotors mit homogener Ladungsverteilung ist nur innerhalb eines Zündfensters von $(0,6 < \lambda < 1,6)$ möglich [7].

Die direkte Einspritzung des Kraftstoffs in den Brennraum ermöglicht die gezielte Schichtung der Ladung im Brennraum. Das Ziel ist es, ein lokal zündfähiges Gemisch an der Zündkerze zu konzentrieren, das im idealisierten Fall von reiner Luft oder Restgas umgeben ist. Dies hat neben der Vermeidung von Drosselverlusten den Vorteil einer isolierten Verbrennung im Zentrum des Brennraumes. Die Luft bzw. das umgebende Restgas verringert die Wärmeverluste an den Brennraumwänden und erhöht somit zusätzlich den Wirkungsgrad.

Der Betriebsbereich, in dem ein Ottomotor mit geschichteter Ladung betrieben werden kann, ist sowohl drehzahl- als auch lastbegrenzt. Abbildung 2.4 zeigt ein mögliches Betriebskennfeld eines direkteinspritzenden Ottomotors [8]. Bei hohen Drehzahlen reicht die zur Verfügung stehende Zeit auch bei niedrigen Lasten nicht zur vollständigen Verdampfung des Kraftstoffs aus. Zum Erreichen einer hohen Motorlast ist ein stöchiometrisches und in der Volllast ggf. sogar ein fettes

Gemisch nötig. In diesem Betriebsbereich wird der BDE-Motor ähnlich wie ein konventioneller Ottomotor mit äußerer Gemischbildung betrieben. Hierbei wird durch eine frühe Einspritzung im Ansaugtakt ein hoher Grad der Homogenisierung des Luft-Kraftstoff-Gemisches gewährleistet. Im Vergleich zum Saugrohreinspritzmotor liegen die Verdichtungsendtemperaturen in dieser Betriebsart aufgrund der Kühlung durch die Verdampfung ca. 50 K niedriger. Dies kann dazu genutzt werden, das Verdichtungsverhältnis zu erhöhen, was ebenfalls zu einer Wirkungsgradverbesserung beiträgt [9]. Weiterhin wird durch den nachträglich eingebrachten Kraftstoff die Zylinderfüllung verbessert, was die Leistungsausbeute weiter steigert. Dem entgegen steht die größere Verlustleistung zum Antrieb der Hochdruckeinspritzpumpe und geringfügig höhere Reibungsverluste durch höhere Spitzendrücke [10].

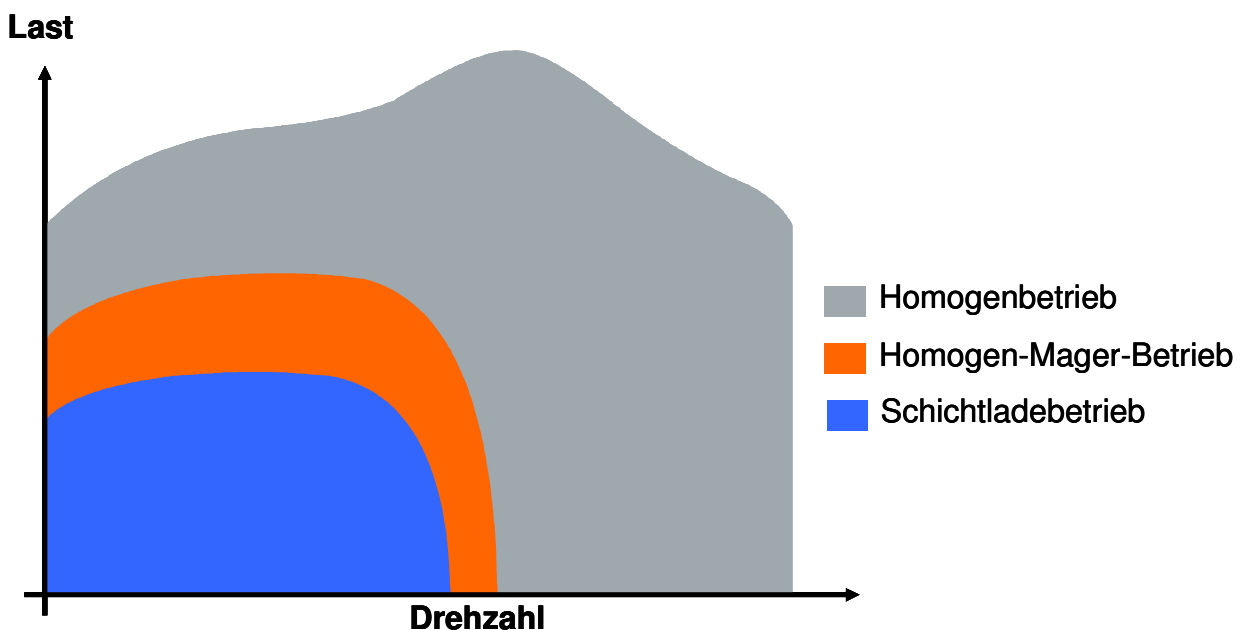


Abbildung 2.4: Betriebskennfeld eines FSI®-Ottomotors² [8]

Um auch in Bereichen, in denen aus den eben genannten Gründen keine Ladungsschichtung möglich ist, den Verbrauch zu reduzieren, wird der Motor mit einem homogen-mageren Gemisch betrieben.

Die Ladungsschichtung im Brennraum durch Direkteinspritzung lässt sich durch verschiedene Konzepte erreichen. Die Abbildung 2.5 zeigt eine Gegenüberstellung des strahlgeführten, luftgeführten und wandgeführten Verfahrens.

² FSI® ist die Bezeichnung für das Volkswagen-Brennverfahren von Ottomotoren mit Direkteinspritzung

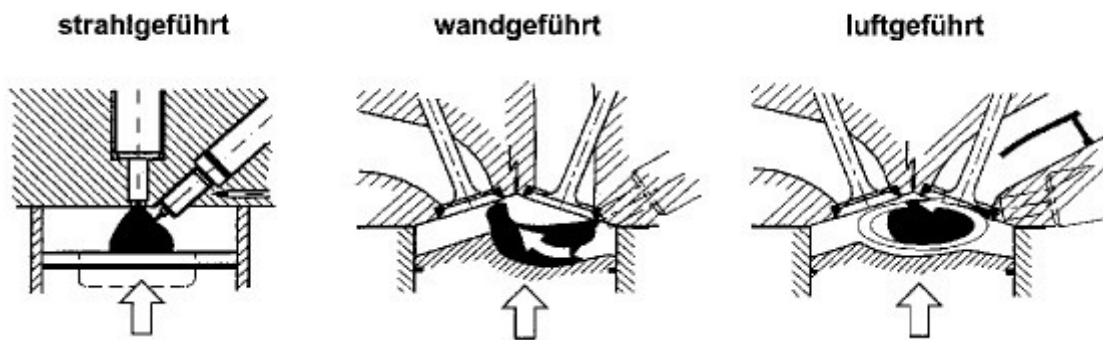


Abbildung 2.5: Klassifizierung der Brennverfahren zur Ladungsschichtung [6]

Die **strahlgeführten** Verfahren versprechen das größte Verbrauchseinsparungspotenzial [11]. Hierbei nimmt der Injektor die zentrale Position im Brennraumdach ein. Die Zündkerze befindet sich in unmittelbarer Nähe zur Einspritzdüse am Einspritzstrahlrand. Mit dieser Anordnung lassen sich räumlich sehr eng begrenzte zündfähige Gemischwolken bei global sehr mageren Kraftstoff-Luftgemischen realisieren. Da der räumliche Lambdagradiant bei dieser Anordnung sehr hoch ist, stellt das Verfahren hohe Ansprüche an die Einspritzstrahlqualität und –geometrie. Bereits geringfügige Beeinträchtigungen des Einspritzstrahls beispielsweise durch die Verkantung der Einspritzdüse führen zu instabilem Brennverhalten und Zündaussetzern [6]. Der Zeitraum, der zur Gemischverdampfung zur Verfügung steht, ist im Vergleich zu den beiden anderen Verfahren sehr kurz, was den Applikationsaufwand zur Vermeidung von Rußbildung erhöht. Vorteilhaft wirkt sich das Verfahren bei den Kohlenwasserstoffemissionen aus, da die Brennraumoberflächen nicht direkt mit Kraftstoff benetzt werden.

Die Zündkerze unterliegt erhöhter Belastung durch Thermoschock, da sie während der Einspritzung durch den Kontakt mit flüssigem Kraftstoff stark abgekühlt und durch die anschließende Verbrennung wieder aufgeheizt wird. Aufgrund der hohen Anforderung an die Systemkomponenten gibt es bislang nur wenige Fahrzeuge mit geringer Stückzahl, die dieses Motorkonzept verwenden. Als Beispiel sei der Mercedes CLS 350 angeführt, dessen 3,5 l-Motor nach dem eben beschriebenen Brennverfahren arbeitet [12, 13].

Luftgeführte Verfahren transportieren den eingespritzten Kraftstoff durch eine gezielte Luftströmung im Brennraum in Richtung Zündkerze. Zu Beginn der Entwicklung von direkteinspritzenden Brennverfahren wurden auch Ansätze mit Muldenkolben und Drallströmungen um die Zylinderachse verfolgt [14]. Heutzutage beruht der Großteil der Verfahren auf Motoren mit Mehrventilzylinderköpfen in Verbindung mit einer walzenartigen Tumbleströmung, deren Achse parallel zur Kurbelwelle verläuft.

Der Injektor befindet sich hierbei seitlich unterhalb der Einlasskanäle. Der Kolben weist eine leichte Muldenform auf, die jedoch nur zur Unterstützung der Tumbleströmung im Brennraum dient und im Gegensatz zu den wandgeführten Verfahren keine direkte Leitfunktion des Kraftstoffes übernimmt. Da die Brennraumoberflächen nicht direkt mit Kraftstoff benetzt werden und eine relativ lange Gemischbildungszeit zur Verfügung steht, weisen diese Verfahren geringe HC

und Rußemissionen auf. Die Qualität des Motorlaufes hängt allerdings stark von der Stabilität der Luftströmung im Brennraum ab. Diese unterliegt zyklischen Schwankungen, so dass die Beherrschung der Verfahren unter realen Betriebsbedingungen eine große Herausforderung darstellt.

Bei den **wandgeführten** Verfahren wird der Kraftstoff während der Aufwärtsbewegung des Kolbens durch eine Mulde in dessen Oberfläche in Richtung Zündkerze umgelenkt. Analog zu den luftgeführten Verfahren ist die für die Gemischbildung zur Verfügung stehende Zeit durch die seitliche Lage des Injektors relativ lang, was sich positiv auf die Ruß-Emissionen auswirkt. Beim Kaltstart führt die Umlenkung über die Kolbenmulde allerdings zu erhöhten HC-Emissionen, da sich flüssiger Kraftstoff auf den kalten Oberflächen der Kolbenmulde und des Brennraumdaches niederschlägt und langsam verdampft [15]. Der Hauptvorteil der wandgeführten Verfahren gegenüber den bereits genannten Alternativen ist die Stabilität der Gemischaufbereitung, da diese nicht nur von der Luftströmung und der Einspritzstrahlqualität abhängig ist, sondern durch die feste Kolbengeometrie unterstützt wird.

Ein Nachteil von qualitätsgeregelten, ottomotorischen Brennverfahren ist die Notwendigkeit einer erweiterten Abgasnachbehandlung. Da die Verbrennung während des geschichteten Betriebs unter Sauerstoffüberschuss erfolgt und der 3-Wege-Katalysator nur bei nahezu stöchiometrischer Verbrennung funktioniert, müssen die entstehenden NO_x Emissionen anderweitig behandelt werden. Hierzu wurden Speicherkatalysatoren entwickelt, die in der Lage sind NO_x einzulagern, um es anschließend bei Erreichung eines definierten Füllzustands unter kurzzeitiger Anfeuchtung des Gemisches wieder zu reduzieren [16]. Der Einsatz von Speicherkatalysatoren setzt den Betrieb mit schwefelfreiem Kraftstoff voraus, da Schwefel den Katalysator „vergiftet“ und die Speicherkapazität deutlich reduziert [16].

2.3 Das Volkswagen FSI-Brennverfahren

Den im Rahmen dieser Arbeit untersuchten 1,6 l und 2,0 l FSI-Motoren liegt die Volkswagen FSI-Technologie zu Grunde. Hierbei handelt es sich um ein Brennverfahren, das die Vorzüge der Stabilität der wandgeführten Gemischbildung mit den Emissionsvorteilen der luftgeführten Gemischbildung kombiniert.

Die Abbildung 2.6 zeigt den Querschnitt durch den Brennraum eines FSI-Motors. Der Einlasskanal ist durch ein so genanntes Tumbleblech³ in zwei Hälften geteilt, wobei der untere Teil durch eine Ladungsbewegungsklappe (LBK) verschlossen werden kann. Im homogenen Betrieb wird der Kraftstoff früh während der Ansaugphase eingespritzt. Die Stellung der Ladungsbewegungsklappe richtet sich nach der Drehzahl und der Last des Motors. Ist die LBK wie im dargestellten Fall geöffnet, so bildet sich im Brennraum ein schwacher Tumble³ aus, der in der späten Phase

³ Tumble bezeichnet die walzenförmige Strömung, deren Achse parallel zur Kurbelwelle verläuft und die charakteristisch ist für viele Brennverfahren von 4-Ventilmotoren.

der Kompression zerfällt. Ist die LBK während der Ansaugphase geschlossen, wird der Strömungsquerschnitt eingeschnürt, so dass sich die Strömungsgeschwindigkeit erhöht und die Luft über den oberen Rand des Ventils in den Brennraum einströmt. Als Folge bildet sich ein deutlich stärkerer Tumble aus. Die aus der frühen Einspritzung resultierende lange Gemischbildungszeit und die definierte Ladungsbewegung sorgen für eine gute Durchmischung von Luft und verdampftem Kraftstoff.

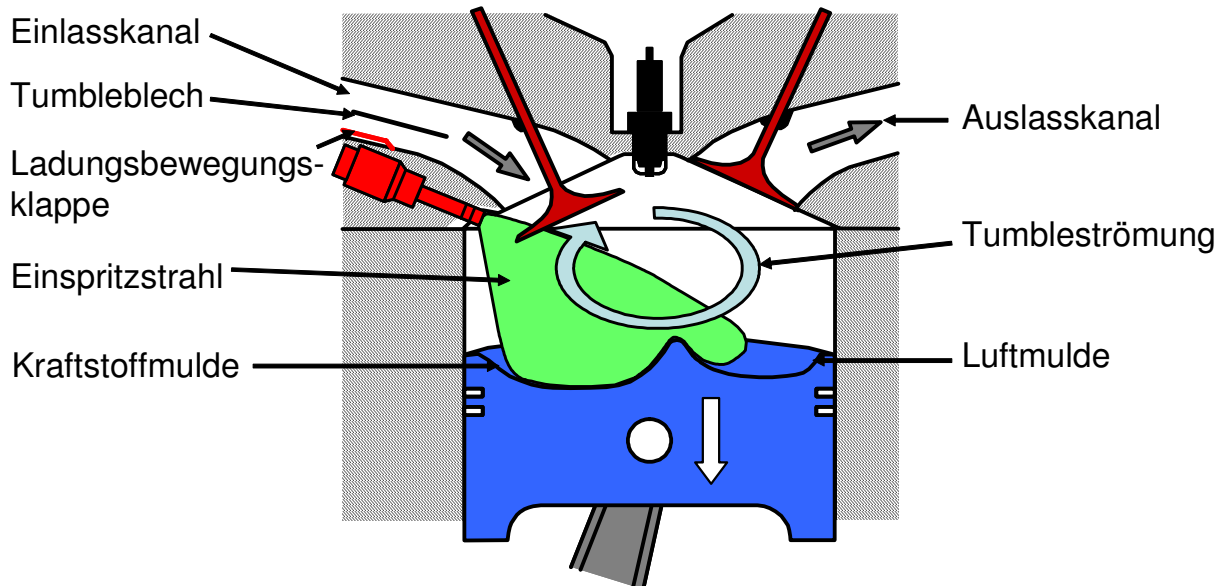


Abbildung 2.6: FSI®-Brennverfahren im homogenen Betrieb

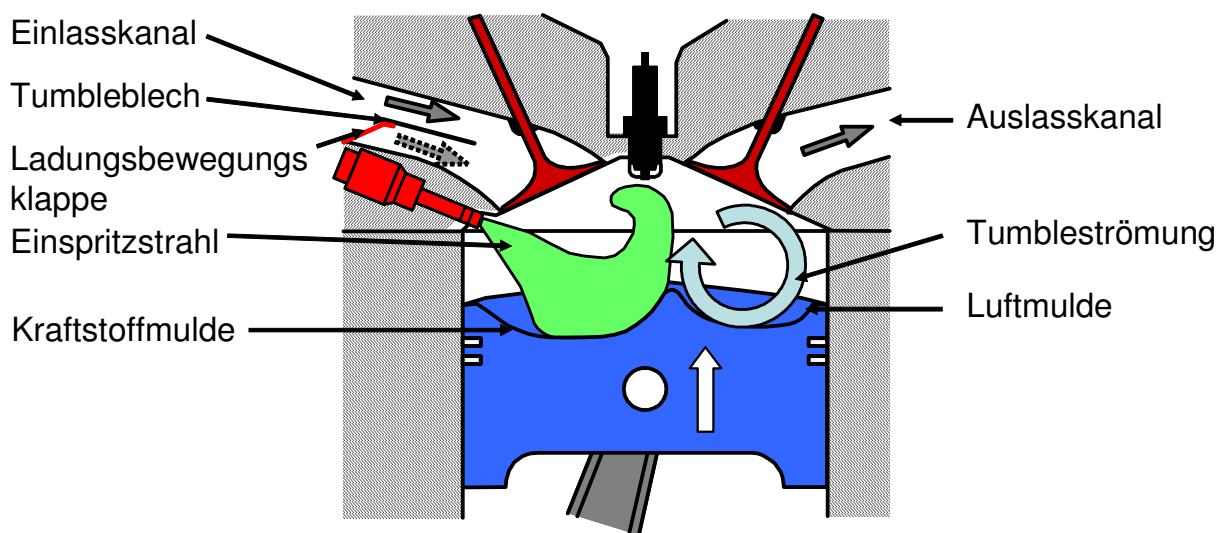


Abbildung 2.7: FSI®-Brennverfahren im Schichtbetrieb

Im Schichtbetrieb (siehe Abbildung 2.7) erfolgt die Einspritzung des Kraftstoffs spät in der Kompressionsphase. Hier ist die Kolbengeometrie von entscheidender Bedeutung, da der Kraftstoff durch die Kraftstoffmulde in Richtung Zündkerze umgelenkt wird. Aufgrund der geschlossenen Ladungsbewegungs-klappe bildet sich ein starker Tumble aus, der in der späten Phase der Kom-

pression durch den Impuls der Einspritzung und die Geometrie des Kolbens in den Bereich der Luftmulde gedrängt wird. Dies sorgt trotz der kurzen Gemischbildungszeit für eine gute Durchmischung des Kraftstoffs und der angesaugten Luft und verhindert, dass die Gemischwolke über die Kante zwischen Luft- und Kraftstoffmulde hinausweht und ihr Ziel in der Nähe der Zündkerze verfehlt.

Sowohl für den geschichteten als auch für den homogenen Betrieb gilt, dass eine emissionsarme und wirkungsgradoptimierte Verbrennung das Ergebnis des komplexen Zusammenspiels der Parameter Motordrehzahl, Drosselklappenstellung, Stellung der LBK, Einspritzdruck, Einspritzdauer, Einspritzzeitpunkt, Ventilsteuerzeiten, Kolbengeometrie und Zündzeitpunkt ist [17, 18]. Die klassische Zylinderdruckindizierung als Entwicklungswerkzeug zur systematischen Untersuchung der Gemischbildungsmechanismen muss daher um weitere Messverfahren ergänzt werden.

Bezüglich der im weiteren Verlauf dieser Arbeit benannten Einspritzparameter werden bei Volkswagen je nach Betriebsmodus unterschiedliche Definitionen verwendet. Die Einspritzdauer, t_i , definiert in allen Betriebsmodi die Dauer der elektrischen Ansteuerung des Einspritzventils. Der Einspritzzeitpunkt wird im Homogenbetrieb durch den sogenannten Ansteuerbeginn, *ASB*, festgelegt und bezieht sich auf Beginn der elektrischen Ansteuerung des Einspritzventils, wohingegen im Schichtbetrieb das elektrische Ansteuerende, *ASE*, festgelegt wird. Im Schichtbetrieb führt eine Verlängerung der Einspritzdauer bei konstantem Einspritzzeitpunkt somit zu einem früheren Beginn der Einspritzung während im Homogenbetrieb das Ende der Einspritzung verschoben wird.

3 Methoden zur Analyse der lokalen Gemischverteilung und Gemischzusammensetzung

Die Optimierung bestehender und die Entwicklung neuer Brennverfahren erfordert detailliertes Wissen über die Güte der innermotorischen Gemischbildung. Insbesondere das Luft-Kraftstoff-Verhältnis am Zündort, λ , hat maßgeblichen Einfluss auf eine optimale Entflammung und die anschließende Verbrennung [19]. Mehrere Studien haben sich bereits mit dem Einfluss der Kraftstoffkonzentration am Zündort auf die zyklischen Schwankungen der Verbrennung befasst [20, 21]. Daher ist es von großer Bedeutung, die zeitliche Entwicklung der Kraftstoffkonzentration an der Zündkerze genau zu kennen.

Es existieren mehrere Verfahren zur Bestimmung der Kraftstoffkonzentration am Zündort. Bei den seit mehr als 30 Jahren eingesetzten Gasentnahmeverfahren [22] werden kontinuierliche und getaktete Gasentnahmeventile dazu verwendet, um Gasproben direkt aus dem Brennraum zu entnehmen. Häufig werden diese Ventile in Zündkerzen integriert, so dass kein gesonderter Zugang zum Brennraum nötig ist [23, 24]. Daran angeschlossen können schnelle Flammenionisationsdetektoren (FID) dazu genutzt werden, den zeitlichen Verlauf der Kraftstoffkonzentration zu messen [25]. Hierbei wird das Probegas in einer Wasserstoffflamme ionisiert, wobei die Anzahl der frei werdenden Elektronen proportional zur Menge der Kohlenstoffatome ist. Die Elektronen werden an einem Gitter aufgefangen und erzeugen dort eine Spannung, die das Messsignal darstellt. Die Länge und das Volumen der Schlauchverbindung zwischen Ventil und Detektor haben erheblichen Einfluss auf die Durchmischung des Probegases vor der Auswertung und den Zeitverzug der Messung, so dass hierbei Kompromisse hinsichtlich Zeitauflösung und Messgenauigkeit eingegangen werden müssen [26]. Weiterhin haben die im Brennraum herrschenden Druckverhältnisse Einfluss auf das Druckgefälle in der Leitung und somit auf Transportgeschwindigkeit des Probegases und den Zeitverzug der Messung [27]. Eine Einzelzyklusanalyse ist nicht möglich, da das Probenvolumen zu gering ist.

Die Messung des Ionenstroms in der Nähe der Zündkerze kann ebenso dazu verwendet werden, auf das Luft-Kraftstoff-Verhältnis zu schließen [28] wie auch die spektroskopische Analyse des Funkenemissionsspektrums [29]. Bei beiden Verfahren ist der Zeitraum der Messung jedoch auf den Zündzeitpunkt beschränkt, der im Regelfall kein freier Parameter ist, sondern das Brennverhalten des Motors massiv beeinflusst. Die Untersuchung der zeitlichen Entwicklung des Luft-Kraftstoff-Verhältnisses innerhalb eines Motorzyklusses ist ebenfalls nicht möglich.

Laserdiagnostische Verfahren werden ebenfalls für die Bestimmung der Kraftstoffkonzentration und der Gemischzusammensetzung im Brennraum eingesetzt [30, 31]. Aktuelle Methoden beruhen auf Ramanstreuung, Mie-Streuung sowie häufig auf Laser-induzierter Fluoreszenz (LIF). Da die Signalintensität der Raman-Streuung gegenüber den potentiellen Störeinflüssen sehr schwach ist, kommt das Verfahren gewöhnlich nur im Laborumfeld zum Einsatz. Beushausen et al. haben jedoch auch Ergebnisse aus Messungen im motorischen Umfeld vorgestellt [32]. Streulichtverfahren werden häufig zur zeitaufgelösten Darstellung von Einspritz- und Strahlausbreitungsphänomenen verwendet, wobei die flüssigen Kraftstofftropfen das eingestrahlte Licht streuen. Marktübliche Systeme erreichen bei hoher Auflösung (Bildwandlerrauflösung 1 MPixel)

Aufzeichnungsraten >10 kHz und sind mit geeigneter Lichtführung auch endoskopisch einsetzbar. Prinzipbedingt ist eine Visualisierung des verdampften Kraftstoffs nicht möglich, so dass sich die Ausbildung des Gemisches aus Kraftstoff und Luft nur indirekt beurteilen lässt.

Bei Fluoreszenzuntersuchungen kann zwischen zwei verschiedenen Ansätzen unterschieden werden. Bei den Marker- oder Tracer-Verfahren wird der zu untersuchenden und in der Regel nicht fluoreszierenden Substanz ein spezieller Marker beigelegt, der durch eine geeignete Laserlichtquelle zur Fluoreszenz angeregt wird. Bei Verfahren ohne Tracer fluoresziert die untersuchte Substanz bei Laseranregung selbst, so dass keine weitere Zugabe eines Markers notwendig ist. Bei der Analyse der Gemischbildung von Verbrennungsmotoren kommen je nach Fragestellung beide Verfahren zum Einsatz.

Steht die qualitative Beurteilung von Gemischbildungsprozessen von Realkraftstoffen im Vordergrund, werden meistens die im Kraftstoff enthaltenen Aromaten durch Bestrahlung mit UV-Licht zur Fluoreszenz angeregt. Es ist sowohl der Nachweis der Flüssig- als auch der Dampfphase möglich, wobei keine belastbare Separation der beiden Phasen erfolgt, sondern lediglich anhand der Signalintensität abgeschätzt werden kann. Ein großer Vorteil dieser Methode gegenüber den Tracerverfahren ist, dass die Gemischbildung nicht durch das Hinzufügen fremder Substanzen beeinflusst wird.

Steht die quantitative Auswertung der Fluoreszenzintensität zur Bestimmung des Luft-Kraftstoff-Verhältnisses im Vordergrund, kommen Tracerverfahren zum Einsatz. Hierbei wird häufig ein nicht fluoreszierender Basiskraftstoff mit einem oder mehreren Tracersubstanzen gemischt, deren Fluoreszenzeigenschaften detailliert bekannt sind. Unter Berücksichtigung der motorischen Randbedingungen wie Druck und Temperatur lässt sich anschließend das Luft-Kraftstoff-Verhältnis quantifizieren. Diesem offensichtlichen Vorteil gegenüber den Verfahren unter Verwendung von Realkraftstoff steht der entscheidende Nachteil entgegen, dass eine geeignete Kraftstoff-Tracer Kombination verwendet werden muss, die das Gemischbildungsverhalten des realen, aus einer Vielzahl von Komponenten bestehenden Kraftstoffs abbildet. Die Ergebnisse müssen hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit auf Realkraftstoffe kritisch hinterfragt werden. Eine detaillierte Betrachtung der verwendeten Verfahren und Kombinationen aus Kraftstoff und Tracer folgt in Kapitel 4.

Voraussetzung für zwei-dimensionale Messungen sind ausreichend große optische Zugänge für die Anregungslichtquelle und die Detektionseinheit. Die zumeist erforderliche Modifikation des Motors führt zu deutlichen Veränderungen der thermodynamischen Randbedingungen und verhindert in der Regel den Einsatz an Serienmotoren. Für nicht orts aufgelöste, punktweise Messungen wurde auf Basis von in die Zündkerze integrierten Quarzfasern ebenfalls LIF eingesetzt [33]. In Kapitel 4 wird eine Weiterentwicklung von Bildgebenden LIF-Messungen im Motor vorgestellt. Hierbei werden statt großer Brennraumfenster kleine Bohrungen in Verbindung mit Endoskopen als optische Zugänge genutzt. Dies führt zu geringeren thermodynamischen Abweichungen zum Serienmotor und erleichtert den Aufbau des Versuchsträgers. Weitere Untersuchungen befassen sich mit der Erhöhung der Zeitauflösung von LIF-Messungen. Mit Hilfe eines hochrepetierenden Lasers und einer intensivierten CCD-Kamera werden LIF-Bildsequenzen aus

Einzelmotorzyklen aufgezeichnet und analysiert.

Ein weiteres Verfahren zur Bestimmung von Kraftstoffkonzentrationen beruht auf der Absorption infraroten Lichts durch Kohlenwasserstoffe. Das Licht einer im infraroten emittierenden Quelle wird hierbei entlang einer Absorptionslinie durch den Brennraum eines optisch zugänglichen Motors geleitet und anschließend detektiert. Die Abschwächung des Signals ist bei konstantem Absorptionskoeffizienten und konstanter Absorptionslänge direkt proportional zur mittleren Kraftstoffdichte in der Messstrecke. Alternativ finden Lichtleiter und modifizierte optische Zündkerzen Verwendung, um das Licht durch sehr kleine oder bereits bestehende Öffnungen in den Brennraum ein- und wieder auszukoppeln. Der Einsatz solcher faseroptischen Zündkerzensensors ermöglicht die kurbelwinkelaufgelöste Analyse der Kraftstoffkonzentration an der Zündkerze im Serienmotor [34, 35]. Dies wurde bereits an einigen Forschungs- und Serienmotoren demonstriert und stellt somit ein wichtiges Werkzeug zur Untersuchung zyklischer Schwankungen der Gemischbildung im Brennraum dar.

In Kapitel 5 wird die Anwendung eines Zündkerzensensors in einem ungefeuert wie auch gefeuert betriebenen DI-Ottomotoren beschrieben. Die Entwicklung des Sensors sowie die Grundlagen zu diesen Arbeiten wurden im vom Land Niedersachsen geförderten Projekt „Mimose“ (Miniaturisierte Motorische Sensorik) in Zusammenarbeit der Volkswagen AG, dem Laser-Laboratorium-Göttingen und der Firma LaVision erarbeitet [36]. Das hier gezeigte Verfahren ist in der Lage, die Konzentration von Real-Kraftstoffen im Brennraum zyklus- und kurbelwinkelaufgelöst zu bestimmen. Es wird eine Methode zur Auswertung der Absorptionsrohdaten bis hin zu einer Lambdabestimmung vorgestellt. Zunächst jedoch sollen die Grundlagen der jeweils verwendeten Messmethoden näher erläutert werden.

3.1 Laserinduzierte Fluoreszenz (LIF)

Mit der Entwicklung der geschichteten Ottomotorbrennverfahren kam der genauen Kenntnis der Kraftstoffverteilung im Brennraum immer größere Bedeutung zu. Die laserinduzierte Fluoreszenzspektroskopie hat sich in den letzten 10 Jahren zu einer Standardmesstechnik in der Untersuchung neuer Brennverfahren und Einspritzkomponenten entwickelt. Mit geeigneten Lasern und intensivierten CCD-Kameras kann die Verteilung von Realkraftstoff im Brennraum sowohl in der Flüssigphase als auch in der Gasphase in Form von 2D-Bildern visualisiert werden.

Die laserinduzierte Fluoreszenz kann vereinfacht durch einen 2-stufigen Prozess beschrieben werden, bei dem ein Atom oder Molekül durch die Absorption eines Laserphotons in einen elektronisch angeregten Zustand versetzt wird und nach einer gewissen Zeit wieder in seinen Grundzustand zurückfällt. Dieser Licht emittierende Prozess wird Fluoreszenz genannt.

3.1.1 Zwei-Niveau Modell

Die Grundlage der Spektroskopie ist die Eigenschaft der Atome und Moleküle, nur quantisierte Energiezustände annehmen zu können. Um ein Teilchen von seinem Grundzustandsniveau in den angeregten Zustand zu versetzen, bedarf es der Wechselwirkung mit einem Photon von „geeigneter“ Energie [37]. Die Energie eines Photons wird bestimmt durch:

$$E = h \cdot \nu \quad (3.1)$$

h bezeichnet das Plancksche Wirkungsquantum und ist konstant, somit ist die Energie E eines Photons proportional zu seiner Frequenz ν oder über die Beziehung

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (3.2)$$

umgekehrt proportional zu seiner Wellenlänge λ .

In einem vereinfachten System mit nur zwei Zuständen ist die stimulierte Absorptionsrate für ein einzelnes Molekül in einer idealen, stoßfreien Umgebung ist gegeben durch:

$$b_{12} = B_{12} \cdot g \cdot I_\nu \quad (3.3)$$

mit der Strahlungsdichte I_ν , dem Einstein-Koeffizienten der Absorption B_{12} und der spektralen Überlappung der Absorptionslinie mit der Anregungswellenlänge g .

Das Molekül hat nun mehrere Möglichkeiten, um das angeregte Niveau wieder zu verlassen. Analog zur stimulierten Absorption kann es durch ein einfallendes Photon über stimulierte Emission in den Grundzustand versetzt werden. Die Wahrscheinlichkeit für einen solchen Übergang wird definiert durch:

$$b_{21} = B_{21} \cdot g \cdot I_\nu \quad (3.4)$$

mit dem Einstein-Koeffizienten der stimulierten Emission B_{21} .

Das angeregte Molekül kann ebenfalls durch spontane Emission in den Grundzustand relaxieren. Diese Art des Übergangs unter Lichtemission, dessen Übergangswahrscheinlichkeit durch den Einsteinkoeffizienten A_{21} definiert ist, wird Fluoreszenz genannt.

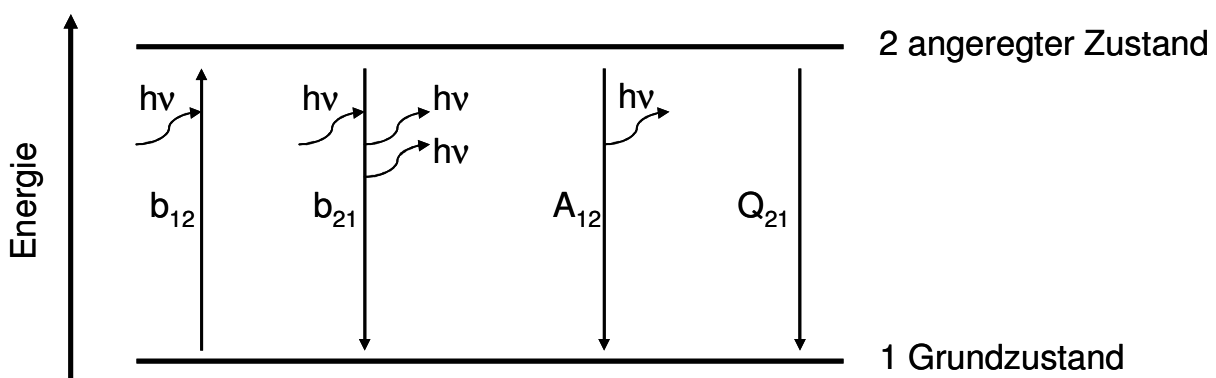


Abbildung 3.1: 2-Niveau-Modell

Weiterhin kann es zu Stoßlöschung dem sog. Quenching kommen. Hierbei wird dem angeregten Molekül durch Stöße mit einem geeigneten Partner Energie entzogen, wodurch es ohne Emission eines Photons wieder in den Grundzustand übergeht. Die Quenchingrate, Q_{21} , ist abhängig

von der Art und Konzentration der umgebenden Teilchen und erschwert die Quantifizierbarkeit des LIF-Signals unter realen Motorbedingungen, da für viele fluoreszierende organische Moleküle insbesondere Sauerstoff bei hohen Drücken ein effektiver Quenchpartner ist.

Fasst man die Wahrscheinlichkeiten für Absorption, Emission und Quenching des 2-Niveau-Modells aus Abbildung 3.1 in jeweils einer Gleichung zusammen, so gilt für die Ratengleichung der Besetzungsdichte des unteren Zustands N_1 und des angeregten Zustands N_2 [37]:

$$\frac{dN_1}{dt} = -b_{12} \cdot N_1 + N_2 \cdot [b_{21} + A_{21} + Q_{21}] \quad (3.5)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = b_{12} \cdot N_1 - N_2 \cdot [b_{21} + A_{21} + Q_{21}] \quad (3.6)$$

Unter der Annahme, dass die Gesamtbesetzungsdichte eines Molekülensembles N die Summe der Besetzungsanzahlen N_1 und N_2 ist,

$$N = N_1 + N_2 \quad (3.7)$$

ergibt sich aus Gleichung 3.5 und 3.6 folgende Differentialgleichung für N_2 :

$$\frac{dN_2}{dt} = b_{12} \cdot N - N_2 \cdot [b_{12} + b_{21} + A_{21} + Q_{21}] \quad (3.8)$$

Mit der Randbedingung $N_2(t=0) = 0$ und mit $\alpha = b_{12} + b_{21} + A_{21} + Q_{21}$ erhält man als Lösung für Gleichung 3.8:

$$N_2(t) = \frac{b_{12} \cdot N}{\alpha} (1 - e^{-\alpha t}) \quad (3.9)$$

Zu Beginn der Laserstrahlung ist $\alpha \ll 1$ und N_2 wird linear mit der Zeit bevölkert.

$$N_2(t) \approx b_{12} \cdot N \cdot t \quad (3.10)$$

Zu einem späteren Zeitpunkt $\alpha \cdot t \gg 1$ stellt sich ein Gleichgewichtszustand zwischen N_1 und N_2 ein. Für die Gesamtbesetzungsanzahl N gilt dann:

$$N_2(t) = \frac{b_{12} \cdot N}{\alpha} \quad (3.11)$$

Durch Einsetzen der Gleichungen 3.3 und 3.4 und Resubstitution von α lässt sich Gleichung 3.11 umformen zu:

$$N_2(t) = N \cdot \frac{B_{12}}{B_{12} + B_{21}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{(A_{21} + Q_{21})c}{(B_{12} + B_{21})I_\nu}} \quad (3.12)$$

Durch Einführung der Sättigungsintensität

$$I_v^{sat} = \frac{(A_{21} + Q_{21})c}{(B_{12} + B_{21})} \quad (3.13)$$

und Substitution in Gleichung 3.12 erhält man für die zu beobachtende Fluoreszenzintensität I schließlich [37]:

$$I \propto A_{21}N_2 = N \frac{B_{12}}{B_{12} + B_{21}} \cdot \frac{A_{21}}{1 + \frac{I_v^{sat}}{I_v}} \quad (3.14)$$

3.1.2 Lineare LIF

Prinzipiell gibt es zwei Möglichkeiten der LIF-Messung. Ist die eingestrahlte Laserintensität geringer als die Sättigungsintensität ($I_v \ll I_v^{sat}$), dann lässt sich Gleichung 3.14 vereinfachen zu:

$$I \propto N \cdot B_{12} \cdot I_v \cdot \underbrace{\frac{A_{21}}{A_{21} + Q_{21}}}_{\text{Stern-Volmer-Faktor}} \quad (3.15)$$

Die Fluoreszenzintensität ist in diesem Fall direkt proportional zur Laserintensität und zum so genannten Stern-Volmer-Faktor, der maßgeblich durch die Quenchingrate Q_{21} beeinflusst wird. Man spricht dann von linearer LIF.

Quenching stellt ein großes Problem für die Quantifizierbarkeit des LIF-Signals dar. Die Quenchingrate ist abhängig von den beteiligten Energieniveaus, der chemischen Zusammensetzung der umgebenden Stoßpartner sowie vom Druck und der Temperatur. Da Realkraftstoffe Gemische fluoreszierender Substanzen mit jeweils eigenen Bedingungen und verschiedenen Transporteigenschaften sind, ist lediglich eine qualitative Auswertung der LIF-Signale möglich.

3.1.3 Sättigungs-LIF

Ist die eingestrahlte Laserintensität sehr viel größer als die Sättigungsintensität ($I_v \gg I_v^{sat}$), dann ergibt die Vereinfachung von Gleichung 3.14:

$$I \propto N \frac{B_{12} \cdot A_{21}}{B_{12} + B_{21}} \quad (3.16)$$

Die Fluoreszenzintensität ist dann unabhängig von der Intensität der Laseranregung und von der Stoßlöschung (Quenching). Im Sättigungsfall befinden sich im Mittel jeweils 50% der Moleküle im angeregten und im Grundzustand. Die Raten von Absorption und stimulierter Emission sind daher viel höher als die Quenchingrate, welche dadurch vernachlässigbar wird.

Für die quantitative Bestimmung von Luft-Kraftstoff-Gemischen ist die Eliminierung des Einflusses der Quenchingrate ein wesentlicher Vorteil von Sättigungs-LIF gegenüber der linearen LIF, da die sonst zur Quantifizierung benötigten druck- und temperaturabhängigen Quenchraten der

beteiligten Spezies nicht bekannt sein müssen.

Der Nachteil dieser Methode liegt in der schwierigen Realisierbarkeit von zeitlich und räumlich vollständig gesättigten Bedingungen, da das Strahlprofil des zur Anregung verwendeten Lasers in der Regel keine ideale Rechteckform hat und endliche An- und Abklingzeiten aufweist. Weiterhin kommt es durch den hohen Energieeintrag auch zu Dissoziationsprozessen, so dass die Zahl anregbarer und dann fluoreszierender Moleküle während des Laserpulses abnimmt.

3.1.4 LIF an Real-Kraftstoffen unter motorischen Bedingungen

Das in Kapitel 3.1.1 vorgestellte 2-Niveau-Modell beinhaltet eine Reihe von Vereinfachungen gegenüber der Realität. Sowohl der angeregte als auch der Grundzustand sind in mehrere Rotations- und Vibrationsniveaus aufgespalten, die durch Energieaustauschprozesse in Verbindung stehen. So werden dem Wechselspiel aus Absorption und Emission durch die Fluoreszenz in verschiedene untere Zustände sowie durch stoßinduzierte Umverteilungsprozesse zwischen den Rotations- und Vibrationsniveaus Moleküle entzogen. Aufgrund chemischer Reaktionen kann ein angeregtes Molekül dem System auch völlig entzogen werden. Bei der Photodissoziation und Prädissociation zerfällt das Molekül, und bei der Photoionisation wird ein Elektron im angeregten Zustand durch ein weiteres einfallendes Laserphoton in das Kontinuum angeregt. Als Folge daraus lässt sich aus der von der Besetzung des angeregten Zustands abhängigen Fluoreszenz keine Quantifizierung der Besetzung des unteren Niveaus mehr ableiten.

Anhand dieser Modellerweiterung lässt sich jedoch erklären, warum die Wellenlänge der ausgestrahlten Fluoreszenz nicht mit der Anregungswellenlänge übereinstimmen muss. Gemäß Gleichung 3.1 ist die Wellenlänge des ausgestrahlten Lichtes proportional zum Energieunterschied der beteiligten Zustände. Erfolgt der Übergang aus dem angeregten Zustand in einen energetisch höheren Zustand als zum Zeitpunkt vor der Anregung, dann ist die Fluoreszenz langwelliger als die Anregungswellenlänge und man spricht von „Stokes“ verschobener Fluoreszenz. Bei spektraler Verschiebung in entgegengesetzter Richtung spricht man von „Anti-Stokes“ verschobener Fluoreszenz.

Bei LIF-Messungen im Motor und an handelsüblichem Ottokraftstoff ist die Fluoreszenz Stokes verschoben und aufgrund der vielen beteiligten Spezies sehr breitbandig. Die Verwendung eines geeigneten Filters zur Unterdrückung des elastischen Streulichtes auf der Anregungswellenlänge ermöglicht es, die Fluoreszenz der Flüssig- als auch der Dampfphase des Kraftstoffs zu visualisieren. Der qualitative Vergleich des Einspritzstrahls verschiedener Injektoren ist eine Standardanwendung

3.2 Absorptionsspektroskopie

Die Absorptionsspektroskopie ist eine weit verbreitete Technik zur Analyse von Molekülgemischen, da sich die stoffspezifische Lage und Intensität der Absorptionsbanden einer Substanz zu ihrer Identifizierung und Quantifizierung nutzen lassen. Bei der Infrarotspektroskopie (IR-Spektroskopie) wird Licht in einem Wellenlängenbereich von 0,8-1000 μm eingesetzt. Es wird dabei unterschieden zwischen dem nahen Infrarot (NIR 0,8-2,5 μm), dem mittleren Infrarot (MIR 2,5-25 μm) und dem fernen Infrarot (FIR 25-1000 μm) [38]. Eine für die Kraftstoffdetektion inte-

ressante IR-Absorption von Kohlenwasserstoffmolekülbindungen fällt in den mittleren Infrarotbereich und wird daher im Folgenden genauer erläutert.

3.2.1 Theoretische Grundlagen

Aus Gleichung 3.1 ist bekannt, dass ein Lichtquant mit der Frequenz ν_{12} nur von einem Atom oder Molekül absorbiert wird, wenn die Photonenenergie exakt der Energiedifferenz zwischen zwei erlaubten Energieniveaus E_1 und E_2 entspricht. Führt man die in der Spektroskopie üblicherweise verwendete Wellenzahl $\tilde{\nu}_{12}$ des Photons in der Einheit $[\text{cm}^{-1}]$ ein, erhält man:

$$E_1 - E_2 = h \cdot \nu_{12} = h \cdot c \cdot \tilde{\nu}_{12} \quad (3.17)$$

Der energetische Zustand eines Moleküls (E_1 , E_2) setzt sich zusammen aus seiner elektronischen Anregung und seinem Schwingungs- und Rotationszustand. Wird ein Molekül mit elektromagnetischer Strahlung angeregt, kann das Molekül anfangen zu schwingen oder zu rotieren, wenn die Energie ausreicht, es aus seinem Ausgangszustand in einen angeregten Schwingungszustand zu heben. Das Spektrum von Übergängen zwischen Schwingungsniveaus innerhalb desselben elektronischen Zustands in einem Molekül liegt im infraroten Spektralbereich.

Die Interaktion zwischen dem eingestrahlten infraroten Licht und einem rotierenden und schwingenden Molekül ist allerdings nur möglich, wenn das Molekül ein veränderbares Dipolmoment⁴ aufweist (IR aktiv). Bei Absorption von IR-Strahlung kann zwischen drei verschiedene Arten von Schwingungen unterschieden werden [38]:

1. Valenzschwingungen (Streckschwingungen): Schwingungen in Richtung der Bindungsachse zweier Atome oder Molekülteile durch Dehnung oder Stauchung der Bindung
2. asymmetrische Streckschwingung (Streckschwingungen): Asymmetrische Schwingung zum Molekülmittelpunkt
3. Deformationsschwingungen (Biegeschwingungen): Schwingung unter Deformation des Bindungswinkels

Da die Molekülschwingungen bestimmter Atomgruppen, wie z.B. der Kohlenwasserstoffbindungen des Kraftstoffs, besonders charakteristisch sind, eignet sich die IR-Spektroskopie zur Bestimmung dieser funktionellen Gruppen.

Moleküle, deren Schwingungen symmetrisch zum Schwerpunkt sind wie z.B. die symmetrische Streckschwingung der Kohlendioxidmoleküle, weisen keine Änderungen des Dipolmoments auf und sind IR inaktiv. Gleiches gilt für homonukleare Moleküle wie z.B. O_2 oder N_2 , die prinzipiell

⁴ Ein Dipol ist ein Körper, dessen Schwerpunkte der negativen und positiven Ladungen nicht zusammenfallen. Dipole werden durch ihr von Abstand und Stärke der Ladungen abhängiges Dipolmoment charakterisiert.

ebenfalls kein IR-Spektrum besitzen.

Die auf einer Weglänge Δx durch ein Medium absorbierte Lichtintensität ist für schwache Absorptionen definiert durch [39]:

$$\Delta I(\tilde{\nu}_{12}) = I_0(\tilde{\nu}_{12}) \cdot N_1 \cdot B_{12} \cdot h \cdot \tilde{\nu}_{12} \cdot \Delta x \quad (3.18)$$

wobei $I_0(\nu_{12})$ die eingestrahlte Lichtintensität, N_1 die Anzahl von Molekülen im unteren Energieniveau und B_{12} der Einsteinkoeffizient der Absorption ist.

Bei einer homogenen Verteilung der Absorbermoleküle im Gemisch ergibt sich nach Integration entlang des Absorptionswegs L das Lambert-Beer-Gesetz für die Absorption:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot e^{-\sigma_\lambda CL} \quad (3.19)$$

mit der Absorberkonzentration C (g/l, mol/l), dem wellenlängenabhängigen Absorptionskoeffizienten σ_λ in der entsprechenden Einheit der Konzentration und der eingestrahlten Intensität $I_0(\lambda)$. Stellt man die Gleichung um, so erhält man die dimensionslose Größe der Absorption A , die direkt proportional zu den Größen Konzentration, Absorptionslänge und Absorptionskoeffizient ist.

$$A = -\ln\left(\frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)}\right) = \sigma_\lambda \cdot C \cdot L \quad (3.20)$$

3.2.2 Umgang mit Störgrößen bei Messungen im Brennraum

Um beim Einsatz von IR-Absorptionsverfahren an Realkraftstoffen im Brennraum eine Quantifizierbarkeit der Kraftstoffkonzentration zu erzielen, müssen die auftretenden Störgrößen ebenfalls betrachtet werden. Zu diesen zählen der infrarote Teil der Schwarzkörperstrahlung von heißen Oberflächen im Brennraum sowie die IR-Emission des Kraftstoffs im Brennraum. Das Kirchhoffsche Strahlungsgesetz besagt, dass sich bei einem im thermischen Gleichgewicht befindlichen Körper Absorption und Emission entsprechen. Während der Kompressionsphase nehmen der Brennraumdruck und die Gastemperatur zu, so dass neben der Absorption auch die Emission des Kraftstoffs zunimmt und signifikant zum detektierten Lichtsignal am Detektor beiträgt. Um die Absorption dennoch nach Lambert-Beer berechnen zu können, muss das Detektorsignal um den Einfluss der Emission bereinigt werden. Dies geschieht durch ein zyklisches Blockieren der Beleuchtungsquelle vor dem Eintritt in die Absorptionsstrecke. Im Fall der nicht blockierten Lichtquelle setzt sich das am Detektor messbare Licht aus dem transmittierten Licht der Beleuchtungsquelle und der Emission des heißen Gases sowie der thermischen Strahlung heißer Oberflächen zusammen. Ist die Lichtquelle blockiert, setzt sich das detektierbare Licht ausschließlich aus der Emission von Kraftstoff und heißen Oberflächen aus dem Brennraum zusammen. Die Bildung der Differenz der beiden Signale bereinigt das Messsignal um den Einfluss der Störgrößen und man erhält die Lichtintensität, mittels der die Absorption nach Lambert-Beer berechnet werden kann.

Da sich die infrarote Hintergrundstrahlung der warmen Brennraumbooberflächen aufgrund deren

Wärmekapazität im Vergleich zur Dauer eines Motorzyklus nur sehr langsam verändert, bietet sich eine Signalverarbeitung unter Verwendung von Wechselspannungsverstärkern an. Diese verstärken keine konstanten oder niederfrequenten Signalanteile und führen so bereits zu wirkungsvollen Unterdrückung des konstanten Anteils der Hintergrundstrahlung.

3.2.3 Spektrale Überlappung des Absorptionsspektrums mit dem Detektionsspektrum

Für die Bestimmung der Kraftstoffdichte wird insbesondere die IR-Absorption durch Vibrationsübergänge der C-H-Bindungen im Spektralbereich um $3,4\ \mu\text{m}$ ausgenutzt. Die Abbildung 3.2 zeigt das Absorptionsspektrum von kommerziellem Kraftstoff (Eurosuper), das mit einem FT-IR-Spektrometer der Firma Bruker aufgezeichnet wurde [40] sowie das Transmissionsspektrum des Filters vor der Detektoreinheit des Messsystems. Da herkömmlicher Eurosuper-Kraftstoff aus einer Vielzahl von Kohlenwasserstoffverbindungen besteht, ergibt sich durch die unterschiedlichen Bindungskräfte innerhalb der Moleküle eine Vielzahl von Absorptionslinien, die sich zu einer breiten Absorptionsbande überlagern. Während des Motorzyklusses verändern sich die Druck- und Temperaturverhältnisse im Motor, was zu Verschiebungen und Stauchungen des Absorptionsspektrums führt. Bei schmalbandigen Lichtquellen bzw. schmalbandiger Filterung auf der Detektionsseite muss der Druck- und Temperatureinfluss auf den Absorptionskoeffizienten für eine Quantifizierung der Absorptionsmessungen nach Lambert Beer bekannt sein.

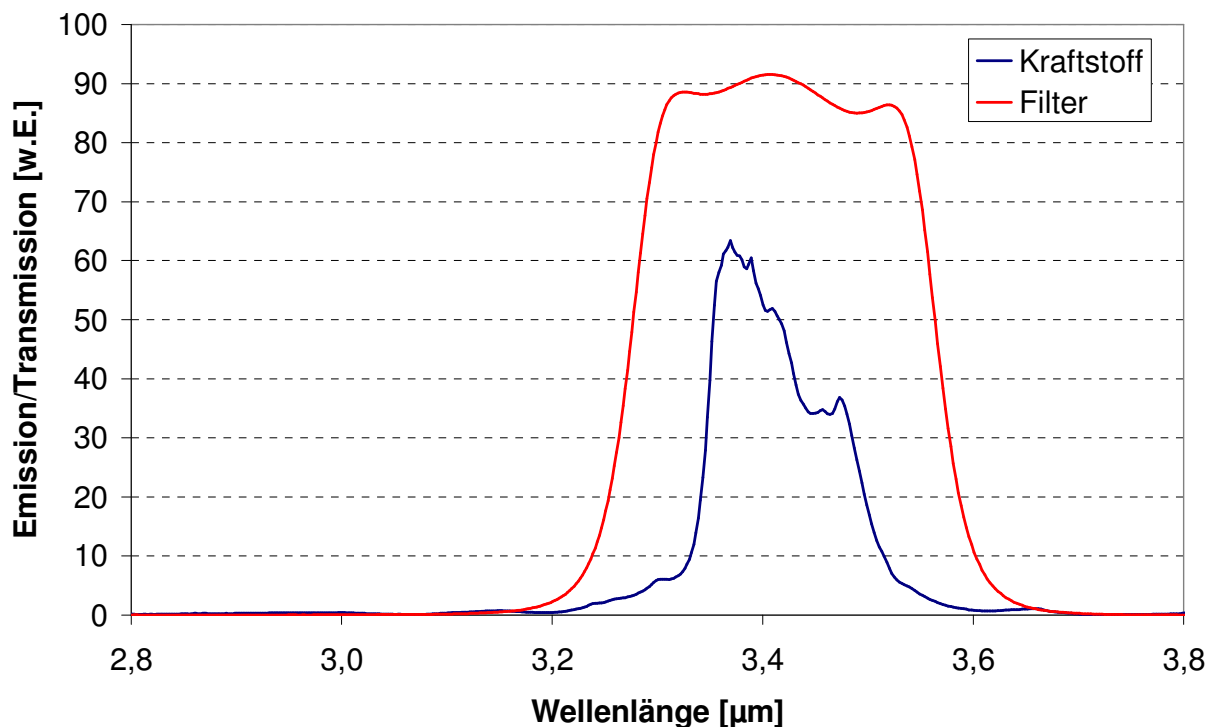


Abbildung 3.2: Transmissionsspektrum des Filters vor dem Detektor sowie Absorptionsspektrum von Eurosuper (Dampf) nach Thiele [40]

Im Fall einer breitbandigen Beleuchtung oder Detektion kann vereinfachend davon aus-

gegangen werden, dass der Absorptionskoeffizient unabhängig von Druck- und Temperaturänderungen [41] ist. Hierbei wird die Absorption aus der über den betrachteten Wellenlängenbereich integrierten Lichtintensität berechnet. Der hierfür benötigte vereinfachte „mittlere“ Absorptionskoeffizient kann durch Kalibriermessungen am Motor mit bekannten Kraftstoffkonzentrationen bestimmt werden. Bei breitbandiger Beleuchtung ist auf eine ausreichende spektrale Überlappung des Absorptionsspektrums und des betrachteten Wellenlängenbereiches zu achten. Bei einer zu geringen spektralen Überdeckung würde eine druck- und temperaturbedingte Formänderung des Absorptionsspektrums dazu führen, dass ein Teil der Absorption nicht mehr in den betrachteten Wellenlängenbereich fällt und somit die Bedingung eines konstanten „mittleren“ Absorptionskoeffizienten verletzt.

Wird der betrachtete Wellenlängenbereich im Vergleich zum Absorptionsspektrum zu weit gefasst, so fällt ein Teil des eingestrahnten Lichtes ohne Abschwächung durch das absorbierende Medium auf den Detektor und führt so zu einem von der Konzentration der zu messenden Spezies unabhängigen Intensitätssockelwert. In diesem Fall ist die Abhängigkeit der Absorption aus Gleichung 3.20 von der Kraftstoffkonzentration, insbesondere bei hohen Konzentrationen, nicht mehr linear.

Bei Messungen am Motor, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden, ist die Länge der Absorptionsstrecke durch die Platzverhältnisse im Sensorkopf eingeschränkt. In Verbindung mit den im typischen Motorbetrieb auftretenden Kraftstoffkonzentrationen führt dies dazu, dass die in der späten Phase der Kompression auftretenden Maximalwerte der Absorption in der Regel kleiner als 0,3 sind und die vereinfachende Annahme eines konstanten Absorptionskoeffizienten nur zu geringen Abweichungen führt. Die Quantifizierung dieser Abweichungen ist Gegenstand von aktuellen Untersuchungen, die auf dem Kenntnisstand dieser Arbeit aufsetzen. Eine weitergehende Beschreibung des Umgangs der im Rahmen der hier vorgestellten Messungen auftretenden Nichtlinearitäten erfolgt in der Beschreibung des Kalibrierverfahrens im ungefeuerten bzw. gefeuerten Motorbetrieb in den Kapiteln 5.1.5 und 5.2.4.

4 Gemischbildungsanalyse mittel LIF

Auf Laser-induzierter Fluoreszenz basierende Messverfahren werden häufig zur Untersuchung von Mischungsprozessen von flüssigen und gasförmigen Stoffen eingesetzt. Die Anwendung kann in Form einer Punktmessung oder Bild-gebend erfolgen. Grundsätzlich kommen zwei verschiedenen Ansätze zum Einsatz.

Bei Verwendung von UV-Lasern können die im Realkraftstoff enthaltenen Aromaten direkt zur Fluoreszenz angeregt werden. Mittels der qualitativen Auswertung von 2-dimensionalen Fluoreszenzbildern sind einfache Vergleiche bei Variation der Gemischbildungsparameter möglich. Es lassen sich sowohl die flüssigen als auch die dampfförmigen Kraftstoffanteile im Brennraum darstellen, wobei keine belastbare Separation der beiden Phasen erfolgt, sondern lediglich anhand der Signalintensität abgeschätzt werden kann. Die Signalintensität aus der Flüssigphase ist um eine ein Vielfaches größer als aus der Gasphase, so dass die Dynamik des Detektionssystems bei der Separation der Signale ebenfalls zu einem limitierenden Element werden kann. Das Verfahren ist dennoch sehr gut zur Beurteilung der Gemischhomogenisierung und zur Visualisierung von lokalen Kraftstoffwolken im Schichtbetrieb von direkteinspritzenden Motoren geeignet [42].

Zur Quantifizierung des Luft-Kraftstoff-Verhältnisses auf Basis der Fluoreszenzmessungen ist die genaue Kenntnis der von Druck- und Temperatur abhängigen Fluoreszenzeigenschaften aller im Kraftstoff befindlichen fluoreszierenden Spezies notwendig. Da diese Parameter für Realkraftstoff, dessen Zusammensetzung natürlichen Schwankungen unterliegt, und die im Brennraum herrschenden Randbedingungen zum Teil nicht vollständig bekannt sind, werden für quantitative Untersuchungen der Kraftstoffkonzentration geeignete nicht fluoreszierende, synthetische Kraftstoffe und Tracer mit bekannten Fluoreszenzeigenschaften verwendet. Ziel bei der Auswahl der Komponenten ist es, das Gemischbildungsverhalten des Realkraftstoffs nachzubilden. Ein von Schulz und Sick [43] verfasstes Review befasst sich detailliert mit der Eignung und den Grenzen von möglichen Fluoreszenztracern bei der Gemischbildungsanalyse von Ottomotoren. Eine Universallösung für alle messtechnischen Fragestellungen existiert nicht, da die Übereinstimmung der Eigenschaften stets nur für einen eingeschränkten Bereich gültig ist. Swindal et al. [44] haben durch Versuche mit verschiedenen siedenden Aldehyden die Homogenisierung der Gemischbildung untersucht und nachgewiesen, dass der Grad der Homogenisierung und die Existenz von Tropfen kurz vor der Zündung stark vom Siedebereich der repräsentierten Kraftstoffkomponente abhängig ist. Weit verbreitete Tracer bei der Entwicklung ottomotorischer Brennverfahren sind zum Beispiel Aceton, Toluol, Nonanon oder Pentanon, die einem Basis-kraftstoff, z.B. Isooktan, in geringen Mengen beigemischt werden.

Bei simultaner Anregung und Messung der Fluoreszenz auf verschiedenen Wellenlängen ist es möglich, die Temperatur zu bestimmen und so deren Einfluss auf die Fluoreszenz zu berücksichtigen, um Luft-Kraftstoff-Verhältnisse zu berechnen [45]. Zur Berechnung der Fluoreszenzeigenschaften unter Berücksichtigung von Druck und Temperatur kommen Modellansätze für den jeweiligen Tracer zum Einsatz. Ein von Thurber et al. entwickeltes Modell für Aceton [46] wurde von Koch et al. für die Verwendung von 3-Pentanon weiterentwickelt, allerdings haben

Koban et al. signifikante Differenzen zwischen berechneten und experimentellen Fluoreszenzintensitäten nachgewiesen [47].

Reboux et al. haben ein Verfahren vorgestellt, bei dem die Fluoreszenzintensität eines Isooktan-Toluol-Sauerstoff-Gemisches bei Drücken $> 2\text{bar}$ aufgrund von Sauerstoffquenching druckunabhängig und somit während der Kompressionsphase im Motor direkt proportional zum Luft-Kraftstoff-Verhältnis ist (sog. Fuel-Air-Ratio-LIF, FAR-LIF, [48]). Koban et al. haben jedoch nachgewiesen, dass dieser Zusammenhang nur bei Raumtemperatur gilt und der Einfluss der Temperatur auf das Sauerstoffquenching bei höheren Temperaturen, wie sie während der Kompressionsphase des Verbrennungsmotors auftreten, berücksichtigt werden muss [49]. Scholz et al. haben quantitative FARLIF Untersuchungen in einer Druckkammer vorgestellt [50], bei der ein Mehrkomponenten Kraftstoff ohne Zugabe von Fluoreszenztracern verwendet wird, der den Spezifikationen von Eurosuper entspricht (Shell Eurosuper colorless). Allerdings konnte noch nicht der gesamte motorisch relevante Temperaturbereich untersucht werden, und es zeigen sich auch hier Temperaturabhängigkeiten der Fluoreszenz, so dass eine parallele Temperaturbestimmung zur Quantifizierung unausweichlich ist.

Messungen mittels Laser-induzierter Exciplex Fluoreszenz (LIEF) sind in der Lage, die Flüssigphase von der Dampfphase getrennt zu detektieren. Hierbei wird einem Modellkraftstoff ein System aus zwei Tracern hinzugefügt. Diese haben die Eigenschaft, dass die Moleküle im angeregten Zustand miteinander reagieren und eine neue fluoreszierende Spezies bilden, den „Excited state complex“ oder kurz Exciplex, dessen Emissionsspektrum sich von dem der Einzelsubstanzen unterscheidet. Über die Fluoreszenz des Tracers wird die Gasphase detektiert, und die Fluoreszenz des Exciplex dient zum Nachweis der Flüssigphase, da die Bildung des Exciplexes in der Flüssigphase dominiert. Aufgrund der spektralen Überlappung der Fluoreszenz ist eine genaue Trennung zur Quantifizierbarkeit der Signale schwierig. Zwar lässt sich das Fluoreszenzspektrum über die Konzentration der Tracer beeinflussen, allerdings ist eine vollständige Separation der beiden Phasen für im motorischen Umfeld eingesetzte Tracerkombinationen nicht möglich. Weiterhin ist der Effekt des Sauerstoffquenchings in der Gasphase deutlich stärker, was eine Quantifizierung der Anteile ebenfalls erschwert [31]. Wieske et al. nutzen simultan durchgeführte Temperaturmessungen, um die Fluoreszenzintensität der Gasphase zu korrigieren [51], allerdings ist die Temperaturabhängigkeit der Fluoreszenz in einer sauerstoffhaltigen Umgebung für die verwendete Tracer-Kombination nicht vollständig bekannt, so dass der Fehler der Methode nicht abschließend quantifiziert werden kann.

Die bislang beschriebenen Verfahren werden fast ausschließlich an Laborflammen, Druckkammern oder an stark modifizierten optisch zugänglichen Motoren eingesetzt. Diese Modifikationen gegenüber Serienmotoren beeinträchtigen die Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse, da die in den Motor eingepassten optischen Bauteile aufgrund der unterschiedlichen Wärmeausdehnung in der Regel größere Toleranzen erfordern. Häufig müssen Kolben und Gehäuse verlängert werden bzw. Kolbenringe modifiziert werden. Dies führt dazu, dass das Verdichtungsverhältnis und der Wärmefluss im Zylinderkopf nicht mehr mit der Referenz übereinstimmen und die thermodynamischen Eigenschaften entsprechend abweichen. Um diese Ab-

weichungen zu verringern werden zunehmend kleinere optische Zugänge zum Brennraum in Verbindung mit endoskopischen Optiken verwendet. Zimmermann hat hierzu ein mehrteiliges, UV-taugliches Endoskop entwickelt, das aus einem mit dem Zylinderkopf verbundenen kompakten Linsenelement und einer Prüfstands-festen externen Detektionsoptik verbunden ist [52]. Kornmesser hat mit einer motorfesten Zerstreuungslinse und einem Standardobjektiv bereits PIV-Messungen am FSI-Motor durchgeführt [53], wobei die Zerstreuungslinse in einem Zwischengehäuse und nicht direkt im Zylinderkopf untergebracht worden ist.

Ein Schwerpunkt der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen liegt in der Durchführung von LIF-Messungen an Motoren mit minimierten optischen Zugängen zum Brennraum. Es werden sowohl Untersuchungen mit einem UV-Endoskop als auch ein alternativer Ansatz mit einem UV-Kameraobjektiv in Verbindung mit in den Zylinderkopf integrierten Zerstreuungslinsen zur Erweiterung des Blickfeldes gegenübergestellt.

Weiterhin beschränken sich die Bild-gebenden Untersuchungen mittels LIF in der Regel auf Einzelbilder aus verschiedenen Motorzyklen, daher wird eine Erhöhung der Bildfolgerate von etablierten Verfahren zur Gemischbildungsanalyse angestrebt, um die Gemischausbreitung innerhalb eines Motorzyklus analysieren zu können. Auch hierzu wird ein Lösungsansatz in den folgenden Kapiteln vorgestellt.

4.1 Lichtquellen und Kameras

Als Lichtquelle stehen gepulste Excimer- und frequenzvervielfachte Nd:YAG Laser mit einer großen Leistungsbandbreite zur Verfügung. KrF* und XeCL* sind häufig eingesetzte Vertreter aus der Gruppe der Excimer-Laser und bieten den Vorzug großer Pulsenergien. Sie erfordern allerdings mehr Aufwand bei der Strahlführung und -formung, da die Strahlhomogenität nicht an das Gaußförmige Intensitätsprofil von Nd:YAG-Lasern heranreicht. Zum Pumpen von Nd:YAG-Lasern kommen sowohl Blitzlampen als auch Laserdioden zum Einsatz. Während erstgenannte Typen zum Erreichen großer Pulsenergien bevorzugt werden, haben letztere den Vorzug von größeren Repetitionsraten. Die nachfolgende Tabelle 4.1 enthält die wesentlichen Kenndaten marktüblicher UV-Laser. Passend dazu werden kommerziell erhältliche gekapselte Strahlführungen angeboten, die den Einsatz im motorischen Umfeld erheblich erleichtern.

	KrF	Frequenz-vervielfachter Nd:YAG
Wellenlänge	248 nm	266 nm (1064 nm / 4)
Repetitionsrate	max. 20 Hz	50 Hz – 10 kHz
Pulsenergie	5 – 500 mJ	60 mJ – 2 mJ

Tabelle 4.1: Übersicht von Laserlichtquellen für LIF-Untersuchungen

Es können punktförmige, linienhafte oder flächige Untersuchungen durchgeführt werden. Im Falle der in dieser Arbeit durchgeführten zwei-dimensionalen Bild-gebenden Messverfahren wird

der Laserstrahl mittels mehrerer Zylinderlinsen zu einem Lichtband geformt. Die Kamera wird zur Detektion der Fluoreszenz rechtwinklig dazu positioniert. Aufgrund der geringen Fluoreszenzintensitäten werden meistens intensivierte CCD-Kameras eingesetzt. Diese unterscheiden sich von gewöhnlichen CCD-Kameras durch eine vorgeschaltete Bildverstärkereinheit, die im Wesentlichen aus einer Photokathode, dem so genannten Multi Channel Plate (MCP), und einer Phosphorschicht bestehen. Einfallende Elektronen schlagen Elektronen aus der Photokathode, die im elektrischen Feld der Photokathode zum MCP beschleunigt werden. Das MCP dient dabei als Sekundärelektronenvervielfacher, dessen Verstärkung über die angelegte Hochspannung gesteuert werden kann. Auf der Phosphorschicht erfolgt die Umwandlung der Elektronen in Photonen des sichtbaren Spektralbereichs, die über einen (faser-) optischen Koppler zum CCD-Chip weitergeleitet werden.

4.2 Optisch zugängliche Motoren

Um den Einsatz optischer Messtechniken an Verbrennungsmotoren zu ermöglichen, können verschiedene konstruktive Ansätze verfolgt werden. Das Ziel ist es immer, den mechanischen Eingriff so gering wie möglich ausfallen zu lassen, da aufgrund der in den Brennraum eingebrachten Glasflächen und der dadurch benötigten größeren Bauteiltoleranzen an den Übergängen zwischen Glas und Metall in der Regel nicht das Verdichtungsverhältnis des Serienpendants erreicht wird. Der Wärmestrom im Motor wird durch die Glasflächen ebenfalls beeinflusst, so dass sich der Druck- und Temperaturverlauf deutlich vom Serienpendant unterscheiden kann. Je größer der Eingriff ist, umso schwieriger lässt sich das Ergebnis auf den Vollmotor übertragen.

4.2.1 Transparentmotor / Glasringmotor

Den größtmöglichen Zugang bieten die so genannten Transparentmotoren, bei denen große Teile des Zylinderkopfes, Kurbelgehäuses oder des Kolbens mit großen Fenstern versehen sind bzw. aus Glas bestehen [54]. Eine bei Ottomotoren verbreitete Variante ist der Glasringmotor. Hierbei wird ein breiter Glasring zwischen das Kurbelgehäuse und den Zylinderkopf gesetzt. Um die Verdichtung wieder auf den ursprünglichen Wert anzupassen, wird der Kolbenfeuersteg verlängert, so dass die Kolbenringe weiterhin in der Zylinderbuchse laufen. Das erhöhte Gewicht der Kolben schränkt den möglichen Drehzahlbereich ein. Die Abdichtung der Übergänge zwischen Metall und Glas ist häufig ein Schwachpunkt, so dass der Lastbereich auch zur Minimierung der Temperaturschwankungen des Motors eingeschränkt ist.

Glasring- oder Transparentmotoren sind als Einzylinderforschungsaggregate von kommerziellen Messtechnikherstellern erhältlich [55] und werden vielfach zur Messtechnikerprobung und zur Grundlagenforschung eingesetzt, da sie das größte Maß an Freiheit bei der Wahl der Zugänge bieten. Mehrzylinderglasringmotoren hingegen haben bei geringfügig schlechterer Zugänglichkeit Vorteile hinsichtlich der Übertragbarkeit von Ergebnissen auf den Vollmotor, da insbesondere die Luftströmung während der Einlassphase sowie der Abgasgegendruck während der Auslassphase maßgeblich durch den Betrieb der übrigen Zylinder beeinflusst werden.

Die Abbildung 4.1 zeigt die Skizze eines bei Volkswagen verwendeten 4-Zylinder Glasringmo-

tors, dessen optischer Zugang auf größtmögliche Blickwinkel ausgelegt worden ist. Das Beispielbild einer LIF-Messung visualisiert die Einspritzung während der Kompression im Schichtbetrieb. Durch die stirnseitige Beobachtung kann der Brennraum bis unter das Dach eingesehen werden.

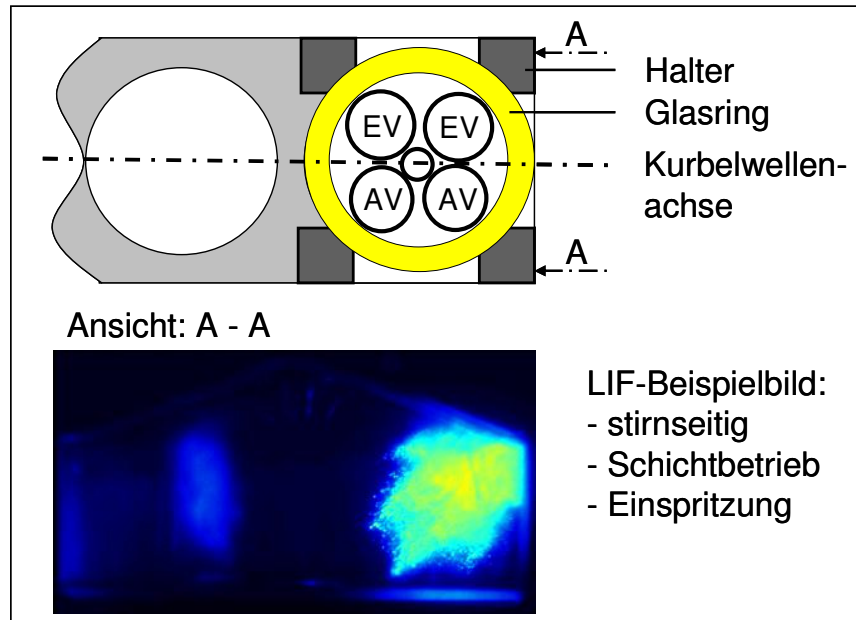


Abbildung 4.1: Skizze Glasringmotor, LIF-Beispielbild

4.2.2 Brillenmotor

Eine weitere Variante eines optisch zugänglichen Mehrzylindermotors ist der „Brillenmotor“. Hierbei wird eine Zwischenplatte zwischen Kurbelgehäuse und Zylinderkopf eingefügt, die mit mehreren Fenstern versehen ist. Analog zum Glasringmotor wird zum Ausgleich des Verdichtungsverhältnisses der Kolbenfeuersteg verlängert. Die wesentlichen Vorteile dieses Zugangs sind die unkomplizierte Fertigung, die Flexibilität bei der Auswahl der Fenstergrößen und die Robustheit im Betrieb. Dem gegenüber stehen Nachteile durch eine frühzeitig eingeschränkte Sicht im Bereich des oberen Totpunkts.

4.3 LIF durch minimierte optische Zugänge

Alle bislang im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Verfahren zur Fluoreszenzuntersuchung benötigen große optische Zugänge und weisen damit die in Kapitel 4.2 beschriebenen Nachteile auf. Insbesondere die Quantifizierung des LIF-Signals, wie bereits zu Beginn von Kapitel 4 beschrieben, setzt den Einsatz von Tracern und die Kenntnis des Drucks und der orts aufgelösten Temperaturverhältnisse voraus, die nur durch den simultanen Einsatz mehrerer Messtechniken erreicht werden kann. Um den Platzbedarf zu begrenzen und die Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse auf den Serienmotor zu vereinfachen, beschränken sich die nachfolgend beschriebenen Versuche auf qualitative Auswertung der Fluoreszenzbilder von Realkraftstoff ohne Zugabe von Tracern. Zu diesem Zweck wurde in der Volkswagen Forschung ein Motor mit endoskopischen Zugängen auf Basis eines 2,0 I-FSI-Motors aufgebaut. Die Anregung und die De-

tektion erfolgten jeweils durch kleine im Zylinderkopf untergebrachte Öffnungen. Im folgenden Abschnitt werden die während der durchgeführten Versuche verwendeten Komponenten beschrieben.

4.3.1 Motor

Die Versuche wurden an einem 2,0l-4V FSI-Forschungsmotor durchgeführt, der mit mehreren endoskopisch nutzbaren Zugängen versehen war und dessen Kenngrößen in nachfolgender Tabelle dargestellt sind.

Hub	92,8 mm
Bohrung	82,5 mm
Verdichtung	11,5 : 1

Tabelle 4.2: Motorkenndaten 2,0l-4V FSI®-Forschungsmotor mit endoskopischem Zugang

Die Abbildung 4.2 zeigt eine Skizze, auf der die Positionen der Brennraumfenster im Zylinderkopf sowie ihre Orientierung zueinander zu erkennen sind. Die Bohrungen befinden sich im rechten Winkel zueinander und sind um 8° geneigt.

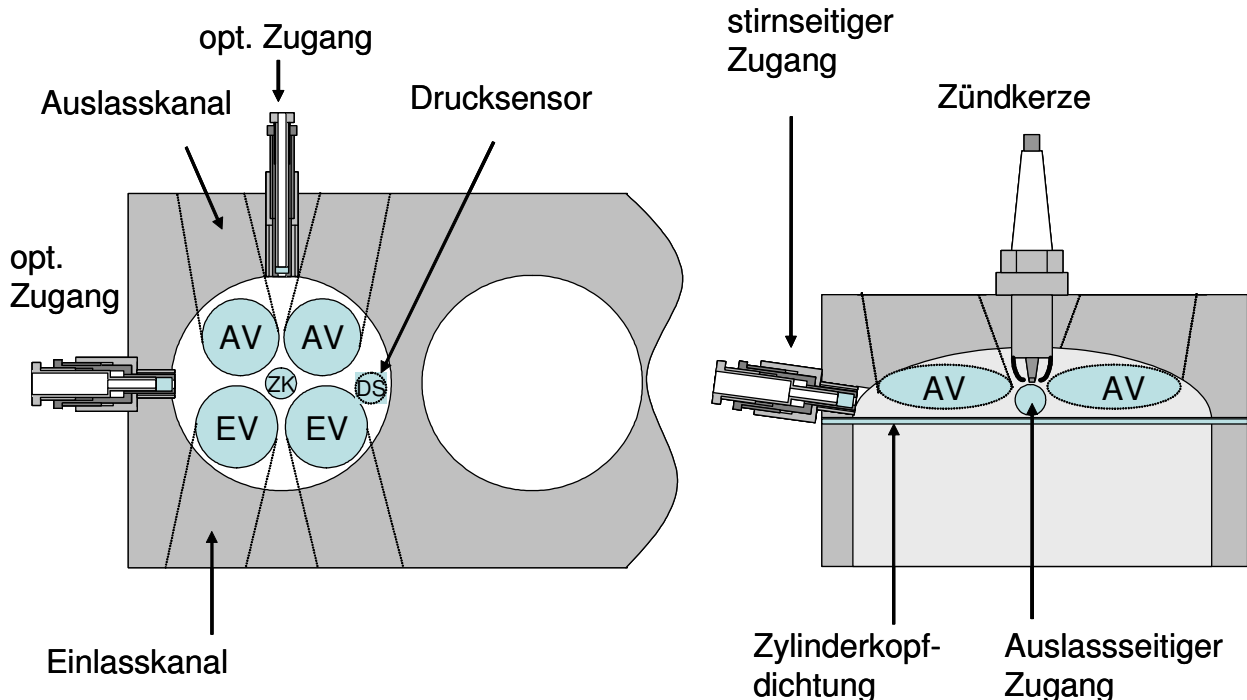


Abbildung 4.2: Übersicht der optischen Zugänge am 2,0l-FSI®-Motor

Da die Brennraumfenster im Betrieb schnell verschmutzen, wurde eine montagefreundliche Hülsenkonstruktion umgesetzt (Abbildung 4.3). Das Brennraumfenster wird durch eine innere Hülse mit einer Kupferdichtung gegen den Schultersitz einer zweiten äußeren Hülse gepresst.

Diese Einheit wird in eine dritte im Zylinderkopf eingeklebte Hülse geschraubt und kann zu Reinigungszwecken mit wenigen Handgriffen demontiert werden. Das Verkleben der dritten Hülse im Zylinderkopf ist notwendig, da der vorhandene Bauraum im Zylinderkopf sehr stark durch den Wasserkreislauf eingeschränkt wird und man bei der Fertigung daher stets Gefahr läuft, diesen zu punktieren. Auch wenn die Materialstärke ausreicht, das Gewinde zur Aufnahme der äußeren Hülse direkt in den Zylinderkopf zu schneiden hat es sich als vorteilhaft erwiesen, eine gesonderte Zylinderkopfhülse zu verwenden, da die häufige Demontage des Brennraumfensters zu dessen Reinigung ein in Aluminium geschnittenes Gewinde überfordert und zu Schäden führt.

Die innere Hülse hat einen minimalen Querschnitt von 9 mm, so dass Endoskope mit einem Durchmesser von 8 mm verwendet werden können, ohne Gefahr zu laufen, im motorischen Betrieb durch Kontakt zu den Hülsewänden mechanisch beschädigt zu werden. Eine formschlüssige Passung des Endoskops in der Hülse scheidet aus thermischen Gründen aus. Die stirnseitige Hülse ist für den Einsatz des nachfolgend beschriebenen UV-Endoskops konstruiert worden und weist daher nach ca. 25 mm einen erweiterten Durchmesser von 15 mm auf.

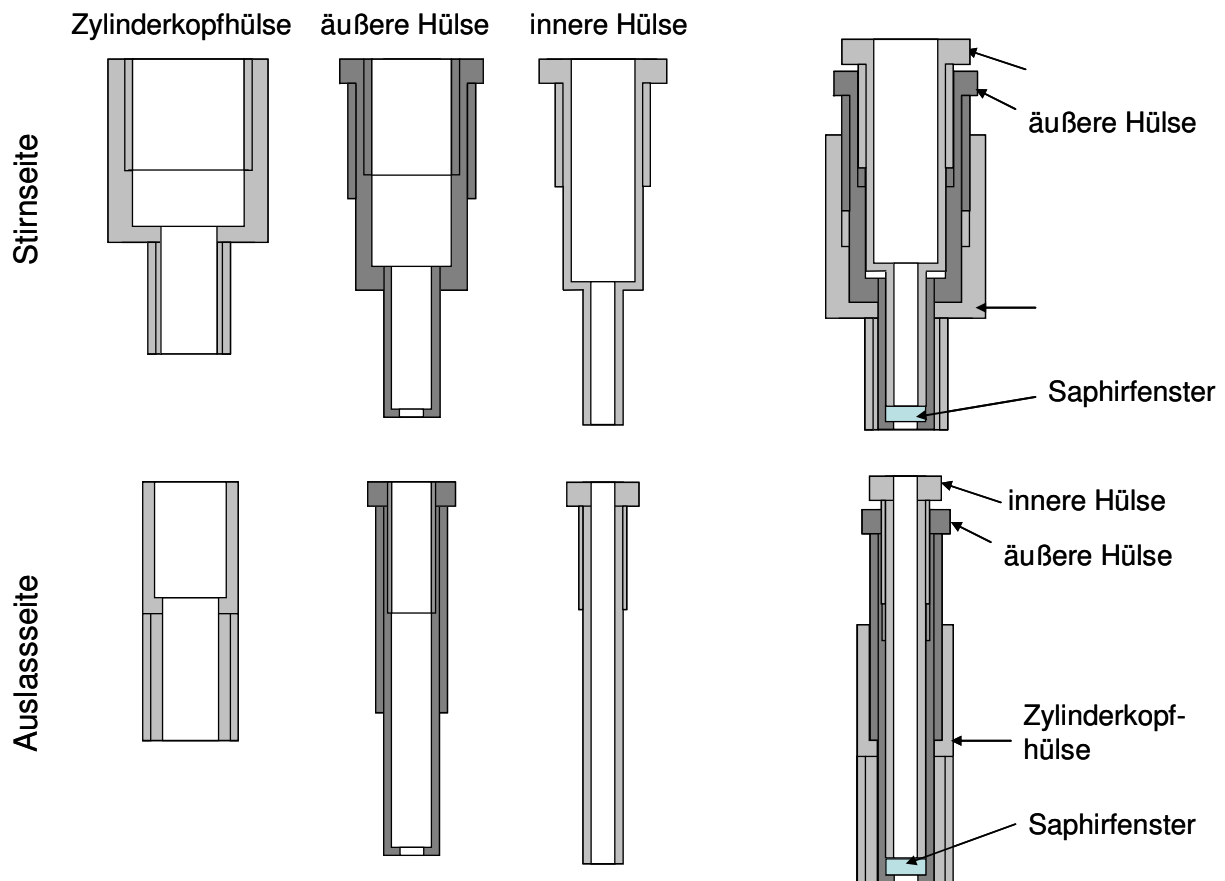


Abbildung 4.3: Realisierung der optischen Zugänge durch ein Hülsensystem

4.3.2 UV-Endoskop

Um große Blickwinkel bei möglichst geringen Öffnungsdurchmessern zu erreichen, werden zwei alternative Ansätze verfolgt. Zum einen wird ein für diesen Anwendungszweck optimiertes En-

doskop verwendet und zum anderen wird ein UV-Standardobjektiv in Verbindung mit einer kleinen Brennraum-nahen Zerstreuungslinse eingesetzt.

Endoskope für verschiedene Aufgaben sind von mehreren Firmen als kommerzielle Produkte erhältlich. Die Hauptanwendungsgebiete sind die Medizin und die Schadensanalyse bzw. Vorbeugung bei technischen Anwendungen. In der Regel bestehen Endoskope aus einem länglichen, starren Rohr, in dessen Inneren sich ein System von Stablinsen befindet, das den betrachteten Gegenstand über ein Okular auf das menschliche Auge oder einen Kamerachip abbildet. Die Beleuchtung ist häufig in Form von Lichtleitern, die das Linsensystem umgeben, in das Endoskop integriert. Diese „Serienendoskope“ sind nur bedingt für UV-Fluoreszenzuntersuchungen in Verbrennungsmotoren geeignet [56], da die Transmission der Linsensysteme nur auf den sichtbaren Wellenlängenbereich optimiert ist. Die achsenparallele Anordnung der Beleuchtungsfasern und der Beobachtungsoptik führen zu Spiegelungen an den Brennraumfenstern.



Abbildung 4.4: Optimiertes UV-Endoskop

Das im Rahmen dieser Arbeit verwendete Endoskop (Abbildung 4.4) ist eine Spezialentwicklung der Fa. LaVision und für spektroskopische Untersuchungen im UV-Bereich optimiert. Da die Beleuchtung bei Lichtschnittuntersuchungen durch einen gesonderten Zugang erfolgt, kann auf ein in das Endoskop integriertes Lichtleiterbündel verzichtet werden. Stattdessen werden die Beobachtungsoptiken so groß wie möglich ausgeführt, um maximale Lichttransmission zu gewährleisten. Im Bereich der Endoskopspitze ist aufgrund der eingeschränkten Platzverhältnisse im Zylinderkopf ein Außendurchmesser von 8 mm nötig, der nach 25 mm auf 15 mm erweitert wird. Der Durchmessersprung ist an dieser Stelle nicht mehr so kritisch, da das Endoskop und die umschließende Hülse hier bereits stirnseitig aus dem Zylinderkopf herausragen und somit mehr Bauraum zur Verfügung steht. Das Endoskop sieht keine Korrektur der chromatischen Abberation vor. Um dennoch eine scharfe Abbildung zu erzielen, ist das Ende des Endoskops mit einem Gehäuse für $\frac{1}{2}''$ Filter versehen, das je nach Anwendungsfall mit passenden Filtern bestückt werden kann.

Die Lichttransmissionseffizienz von Kameraobjektiven wird häufig beschrieben durch die Blendenzahl oder Englisch „f-Number“ ($f\#$). Für Endoskope wird häufig eine effektive $f\#$, $f\#_{eff}$, angegeben, die die Transmissionseffizienz des Endoskops mit der eines Standardobjektivs mit bekannter $f\#$ und gleichem Gesichtsfeld jedoch unterschiedlicher Brennweite vergleicht. Für Standardendoskope im sichtbaren Wellenlängenbereich liegen typische Werte in der Größenordnung von 40 - 50. Auf Lichttransmission optimierte Varianten erreichen Werte kleiner als 20.

Die Abbildung 4.5 zeigt eine Auftragung der $f\#_{eff}$ über der Wellenlänge für das UV-Endoskop der Fa. LaVision. Bis zu einer Wellenlänge von ca. 370 nm ist $f\#_{eff}$ kleiner als 20. Standardendoskope liegen im UV-Bereich in der Regel bei Werten um 100, was einer um den Faktor 25 geringe-

ren Lichtintensität entspricht. Jüngste Entwicklungen zeigen weitere Fortschritte bei der erreichbaren Bildhelligkeit. Reichle et al. haben ein mehrteiliges hybrides Endoskop vorgestellt, dessen Bildhelligkeit das im Rahmen dieser Arbeit verwendete Modell um Faktor 10 übertrifft [57].

Der zweite in der Einleitung zu diesem Unterkapitel bereits erwähnte Ansatz sieht die Verwendung eines UV-Standardobjektivs und einer kleinen Zerstreuungslinse vor. Hierzu wird an Stelle des planen Brennraumsfensters eine bi-konkave Zerstreuungslinse aus Quarzglas vom Typ „Suprasil 1“ mit einer Brennweite von -10 mm in die Hülsen des Zylinderkopfes eingesetzt. Ein UV-Nikkor Objektiv mit einer Brennweite von 105 mm wird hierzu mit einer Reihe von Distanzringen an der Kamera angebracht, so dass die äußere Linse des Objektivs ca. 20 mm von der Zylinderkopfhülse entfernt ist und das Bild scharf abgebildet werden kann. Das resultierende Blickfeld und die Transmissionseigenschaften werden im Verlauf dieser Arbeit in Kapitel 4.3.6 beschrieben.

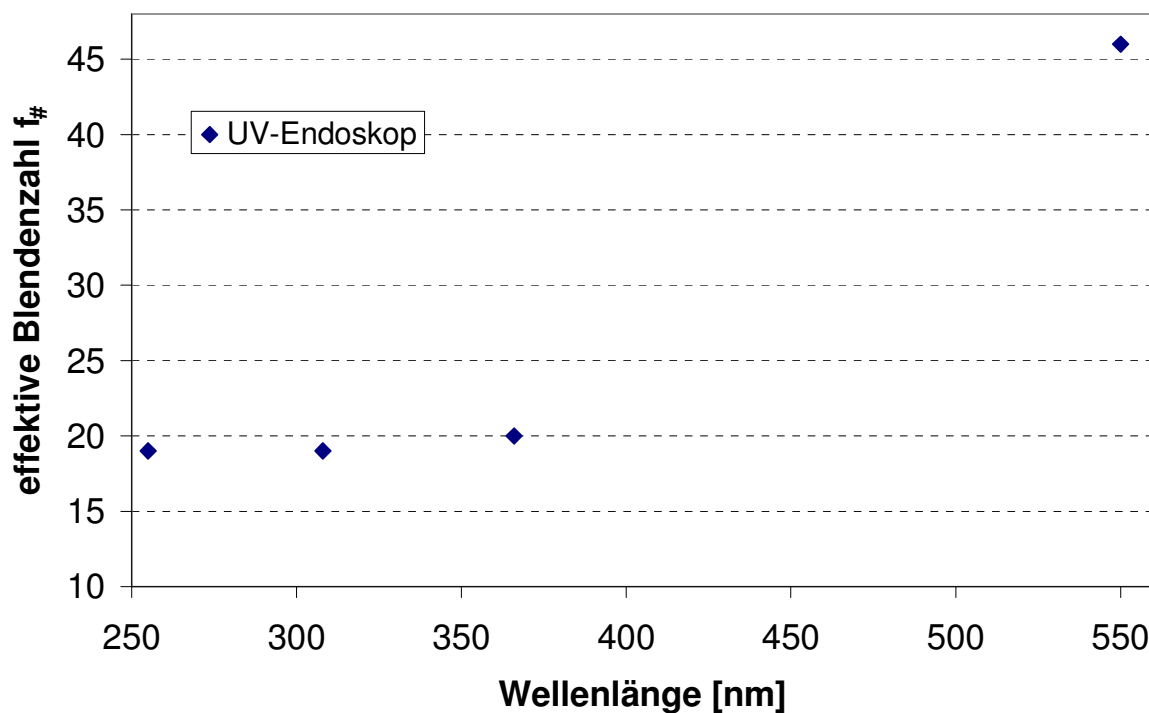


Abbildung 4.5: UV-Endoskop, effektive $f_{\#}$ [58]

4.3.3 LIF-Messsystem

Das Messsystem für Fluoreszenzuntersuchungen, im folgenden auch „Standard-LIF“-System genannt, besteht im Wesentlichen aus einem Laser, einer bildverstärkten Kamera, einem Filter zur Unterdrückung des elastischen Streulichtes, einem Steuerungs-PC zur Datenaufzeichnung und Auswertung sowie einer so genannten Triggerbox zur Synchronisierung des Messsystems mit der Kurbelwellenstellung.

Zur Fluoreszenzanregung des Kraftstoffes wird ein KrF⁺-Excimerlaser der Fa. Lambda Physik

verwendet. Es handelt sich dabei um das Modell Compex 102, dessen technische Eckdaten der Tabelle 4.3 entnommen werden können.

Modellbezeichnung	Compex 102
Pulsenergie	< 330 mJ
Repetitionsrate	20 Hz
Wellenlänge	248 nm

Tabelle 4.3: Technische Daten Compex 102

Bei der verwendeten Kamera handelt es sich um eine CCD Kamera mit integriertem Bildverstärker (ICCD) der Fa. LaVision. Die technischen Daten der Kamera sind in Tabelle 4.4 aufgeführt.

Modellbezeichnung	FlameStar II
Auflösung des Detektors	284 x 384 Pixel
A/D-Wandler	12 Bit
Aufzeichnungsrate	2 Hz
Wellenlängenbereich	190 nm - 800 nm
Belichtungszeit	<100 ns – 999 ms

Tabelle 4.4: Technische Daten FlameStar II [59]

Der Steuerungsrechner ist ein Windows-PC, der mit einer Framegrabberkarte sowie einer TTL-Schnittstellenkarte ausgerüstet ist. Die Softwareoberfläche der Fa. LaVision, „Davis“, steuert über die TTL-Ein- und Ausgänge die Triggerung des Lasers und der Kamera und ermöglicht über eine Interpreterprogrammiersprache die Verwendung eigener Programme und Makros zur Verarbeitung der aufgezeichneten Bilder.

Die Helligkeit der Bilder wird je nach Betriebspunkt in Graustufen, den so genannten „Counts“, gemessen. Die Darstellung der Bilder erfolgt durch die in Abbildung 4.6 vorgestellte Falschfarbenskala. Bei Null beginnend entsprechen schwarze und Blaue Töne einer geringen Lichtintensität, gelbe oder rote Farbtöne symbolisieren eine hohe Lichtintensität.



Abbildung 4.6: Falschfarbenskala

Die Auflösung des Farbbalkens kann zwischen 2^6 und 2^{16} Stufen umfassen. Wird eine niedrigere Auflösung als die maximal auftretende Intensität gewählt, schlägt die Farbskala um und beginnt

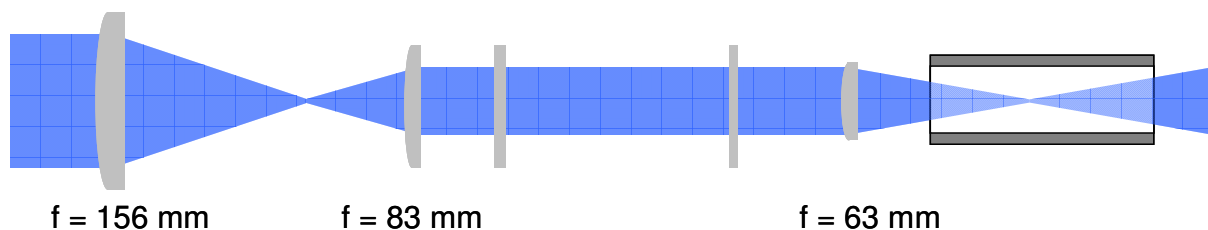
erneut. Dies kommt besonders häufig während der Einspritzphase vor, da das Fluoreszenzsignal der Flüssigphase im Vergleich zur Gasphase um Größenordnungen stärker ist.

Für die Motorzyklus-synchrone Aufzeichnung der Kamerabilder ist eine gemeinsame Zeitbasis erforderlich. Dies wird durch die sogenannte „Triggerbox“, eine im Auftrag von Volkswagen von der Fa. Livingston hergestellte Eigenentwicklung, gewährleistet. Sie stellt dem Messsystem anhand der Signale des an der Kurbelwelle angebrachten Winkelmarkengebers ein eindeutiges 720° Bezugssystem zur Kurbelwelle zur Verfügung. Ein Signal zum als Nullpunkt definierten Ladungswechsel OT markiert den Zyklusbeginn, und ein 1° Kurbelwinkel synchrones Signal dient als Zähler zur Auslösung der Datenaufzeichnung zum gewünschten Zeitpunkt.

4.3.4 Versuchsaufbau und Betriebspunkte LIF-Detektion von Realkraftstoff mittels Endoskop

Die im Folgenden beschriebenen Untersuchungen wurden an einem 2,0l-FSI-Motor auf einem Motorenprüfstand der Volkswagen Forschung durchgeführt. Der Prüfstand ist mit einer Elektromaschine ausgerüstet, die den Motor im gefeuerten Betrieb bremst und im geschleppten Betrieb antreibt. Der Motor ist gemäß seiner Einbaulage im Fahrzeug auch am Prüfstand entlang der Längsachse um ca. 11° gekippt. Der Brennraumzugang ist um ca. 8° in Gegenrichtung geneigt, so dass die Einkoppelung der Laserbeleuchtung mit einer Neigung von 3° erfolgt. Hierzu wird der Laserstrahl mit einer Pulsenergie von 310 mJ nach seinem Austritt über drei Spiegel umgelenkt und entlang eines in der Steigung angepassten Linsenträgerprofils durch fünf Zylinderlinsen zu einem Lichtschnitt geformt (siehe Abbildung 4.7).

Seitenansicht



Draufsicht

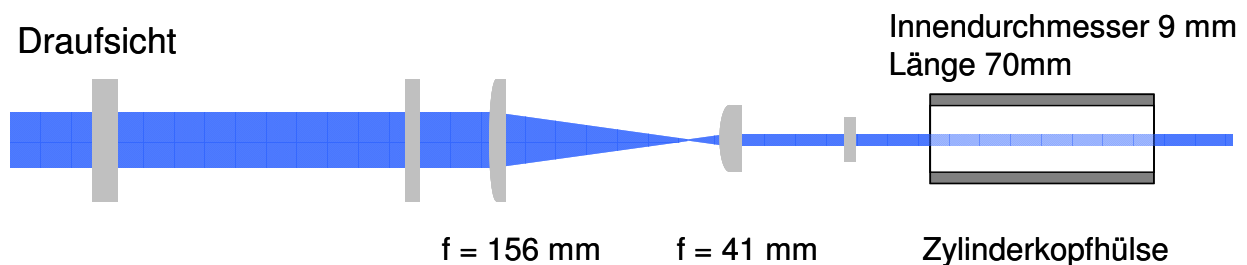


Abbildung 4.7: Linsenaufbau zur Lichtschnittformung

Zunächst wird das rechteckförmige Strahlprofil durch zwei Linsen in Teleskopanordnung in vertikaler Richtung gestaucht und anschließend durch zwei weitere Linsen mit horizontaler Ausrichtung zu einem schmalen (ca. 1 mm) Lichtband fokussiert. Die abschließende fünfte Linse befin-

det sich unmittelbar vor der Zylinderkopfhülse und sorgt für einen in vertikaler Richtung divergenten Laserstrahl im Brennraum. Der Fokus befindet sich im Inneren der Hülse ca. 40 mm vor dem Brennraumfenster.

Die Beobachtungsrichtung ist beim Einsatz des Endoskops auf die Stirnseite beschränkt, da nur hier genügend Bauraum für dessen Unterbringung zur Verfügung steht. Die Kamera wird hierfür auf eine in drei Achsen justierbare Halterung montiert. Die Ausrichtung der Kamera wird an die Motorneigung angepasst, so dass die Unterkante der aufgezeichneten Bilder parallel zu den Kolbenringnuten verläuft. Da der Motor beim Anlaufen und Auslaufen starke Schwingungen vollführt, muss das Endoskop beim Start und beim Beenden des Versuches aus der Zylinderkopfhülse herausgezogen werden. Während des Betriebs sind die Schwingungsamplituden so gering, dass das vorhandene Spiel von 1 mm zur Hülsenwand ausreicht um Beschädigungen der Endoskopspitze vorzubeugen.

Zur Unterdrückung des elastischen Laserstreulichts und da das Endoskop keine Korrektur der chromatischen Abberation vorsieht, wird eine Filterkombination aus einem Bandpassfilter (UG11) und einem Langpassfilter (WG345) eingesetzt. Der Filter UG11 dient hierbei zur Unterdrückung des langwelligen Spektralbereichs, während der Filter WG345 den kurzwelligen Bereich und die Anregungswellenlänge von 248nm unterdrückt, um eine scharfe Abbildung zu erzielen. Um die günstigste Filterkombination aus UG11 und einem Langpassfilter zu ermitteln, wurden Vorversuche mit weiteren Filtertypen durchgeführt (WG 295, GG385). Die Kombination aus UG11 und WG345 stellt hierbei den besten Kompromiss zwischen Transmission und scharfer Abbildung dar⁵.

Mit Hilfe des Endoskops wurden ausschließlich Bilder bei geschlepptem Motor aufgezeichnet, da Temperaturmessungen in der Hülse mit einem Thermoelement während des gefeuerten Betriebs ergeben haben, dass bereits nach kurzer Zeit (< 20 s) Temperaturen jenseits von 150°C erreicht werden und die im Innern des Endoskop verwendeten Klebstoffe nicht für diese Temperaturen ausgelegt sind. Dieser Zeitraum reicht nicht aus, um eine stroboskopische Messung mit sinnvoller Kurbelwinkelauflösung durchzuführen.

Bei Verwendung des UV-Objektivs in Verbindung mit einer UV-Zerstreuungslinse als Brennraumfenster kann die Kamera beim An- und Auslaufen des Motors fest montiert bleiben, da der Abstand des Kameraobjektivs zur Motorhülse groß genug ist und die Linse keinerlei Beschränkungen hinsichtlich der maximalen Temperatur unterliegt. Dieser Aufbau eignet sich daher sehr gut für Messungen im gefeuerten Motorbetrieb.

Im Schleppbetrieb wird lediglich die Zündung der einzelnen Zylinder unterbrochen. Das Einspritztiming und der Einspritzdruck werden unverändert von den gefeuerten Betriebspunkten übernommen. Die Drosselklappenstellung wird so angepasst, dass sich der gleiche Saugrohr-

⁵ Die Filterkurven sind dem Anhang zu entnehmen.

druck einstellt, wie im gefeuerten Betrieb.

Betriebspunkt	1000 VL	1000 TL	1000 Schicht
Betriebsart	Homogen	Homogen	Geschichtet
Last	Volllast	Teillast	Teillast
Drehzahl	1000 min ⁻¹	1000 min ⁻¹	1000 min ⁻¹
Saugrohrdruck, p_{sau}	1010 mbar	320 – 440 mbar	1010 mbar
Einspritzdruck	60 bar	60 bar	90 bar
Einspritzdauer, t_i	4,3 ms	0,97 – 1,76 ms	0,95 ms
Einspritzzeitpunkt ⁶	312°KW v. ZOT	312°KW v. ZOT	60°KW v. ZOT

Tabelle 4.5: Betriebspunktübersicht Endoskop-LIF

4.3.5 Versuchsaufbau LIF-Detektion von Realkraftstoff mittels Objektiv und Zerstreuungslinse

Eine alternative Möglichkeit, LIF-Messungen durch minimierte optische Zugänge durchzuführen, ist die Verwendung eines Standard-Kameraobjektivs in Verbindung mit einer in der Zylinderkopfhülse untergebrachten Zerstreuungslinse zur Erweiterung des Blickfeldes.

⁶ Bei früher Einspritzung im Homogenbetrieb wird das Timing der Einspritzung durch den Ansteuerbeginn definiert, im Schichtbetrieb erfolgt die Definition über das Ansteuerende.

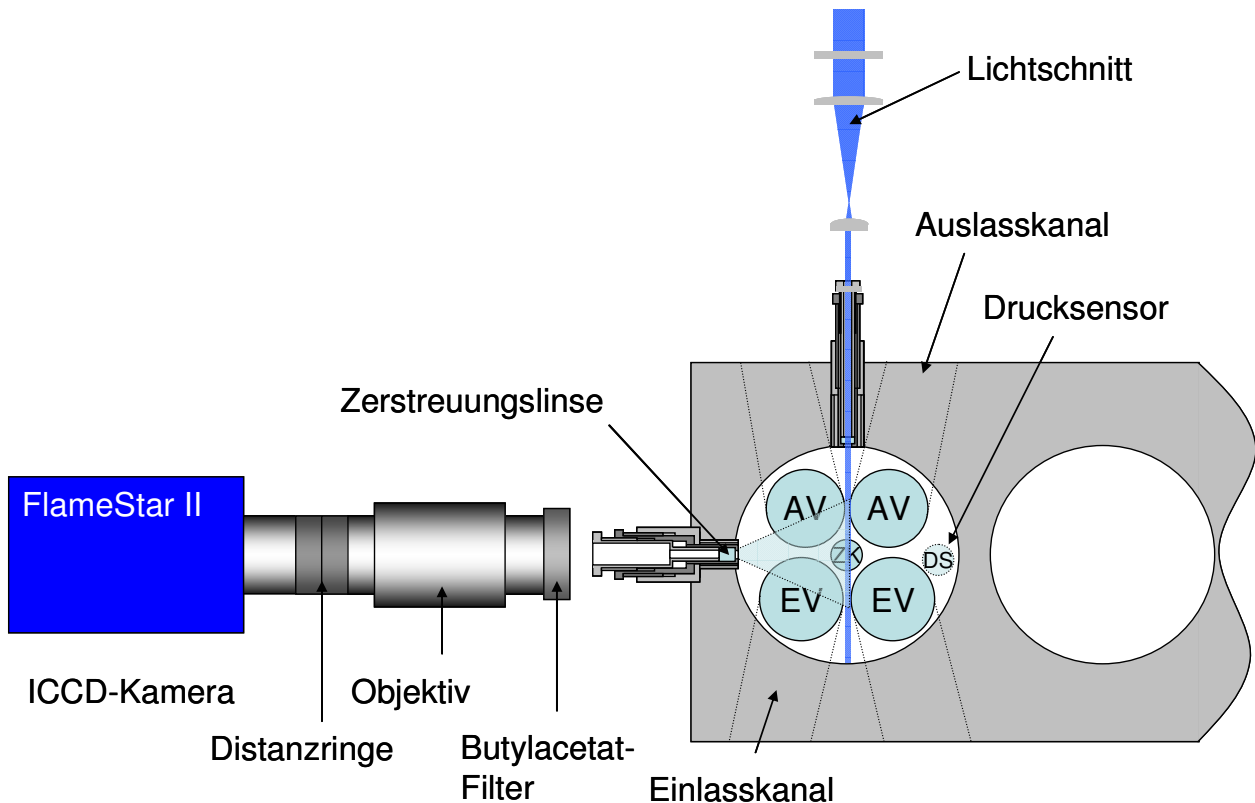


Abbildung 4.8: Aufbau LIF durch minimierten optischen Zugang mittels Zerstreuungslinse

Die Abbildung 4.8 zeigt den Versuchsaufbau am Motorprüfstand. Die Beleuchtung mittels KrF^+ -Laser entspricht der Anordnung der Endoskopuntersuchungen. Beobachtungsseitig wird das durch die in den Zylinderkopf eingebrachten Hülsen gehaltene Brennraumfenster durch eine bikonkave Zerstreuungslinse mit einer Brennweite von -10 mm ersetzt. Das Objektiv (UV-Nikkor 105 mm, f4.5) wird so nah wie möglich vor der Motorhülse platziert, um eine größtmögliche Abbildung auf dem Sensor zu erzielen. Distanzringe zwischen Kamera und Objektiv ermöglichen eine scharfe Abbildung trotz des geringen Objektabstands von ca. 15 cm zwischen Frontlinse und Lichtschneitebene. Zur Unterdrückung des elastisch gestreuten Laserlichtes wird ein Langpass-Butylacetat-Filter eingesetzt, der direkt auf das Filtergewinde des Objektivs geschraubt wird.

Die Abbildung 4.9 zeigt das erzielbare Blickfeld. Ein kreisförmiger Ausschnitt eines stirnseitig aufgezeichneten LIF-Bildes ist zu diesem Zweck einer Schnittzeichnung des Zylinderkopfes überlagert. Auf der linken Seite der Zeichnung ist der Halter für das abschließende Brennraumfenster zu erkennen, während auf der rechten Seite der Kraftstoffinjektor dargestellt wird. Der hell eingegrenzte Streifen im mittleren Bildbereich markiert den Lichtschnitt, dessen Achse gemäß der Lage der Beleuchtungshülse um ca. 8° geneigt ist. Anhand der Zündkerzenkontur im LIF-Bild und des bekannten Abstands zwischen Zündkerze und Brennraumfenster lässt sich der Blickwinkel auf ca. 45° abschätzen.

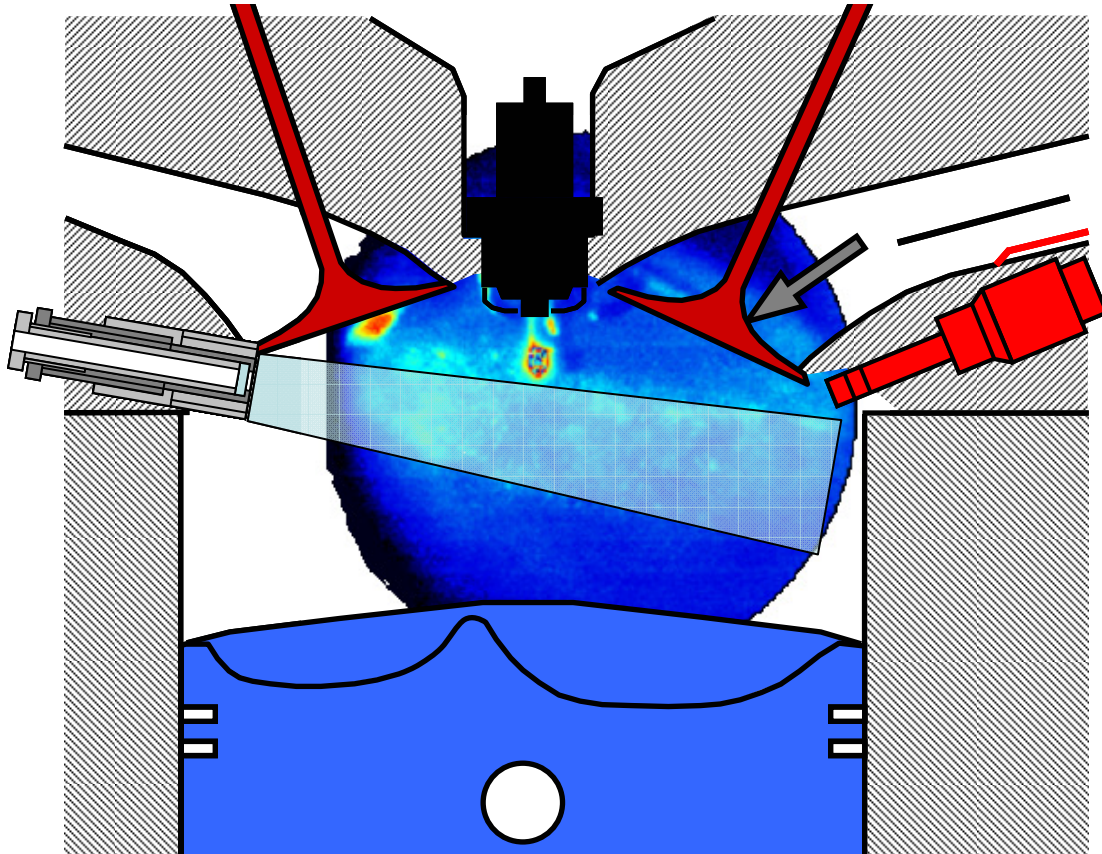


Abbildung 4.9: Blickfeld LIF durch minimierten optischen Zugang mittels Zerstreuungslinse

4.3.6 Ergebnisse LIF-Detektion von Realkraftstoff mittels Endoskop

Die Aufzeichnungsrate des gesamten Messsystems wird durch die Kamerabildfrequenz bestimmt. Das Auslesen des CCD-Chips nimmt hierbei die meiste Zeit in Anspruch, so dass je nach Motordrehzahl nur jeder 6. Motorzyklus aufgezeichnet werden kann. Die in diesem Kapitel vorgestellten Bildsequenzen stammen daher aus verschiedenen Motorzyklen, so dass zyklische Schwankungen zwischen einzelnen Bildern bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden müssen.

Im Rahmen dieser Arbeit ist die Zeitskala des Motorzyklus so definiert, dass der Ladungswechsel-OT, der den Beginn der Ansaugphase definiert, bei 0°KW liegt. Der Zünd-OT zum Ende der Kompressionsphase liegt folglich bei 360°KW.

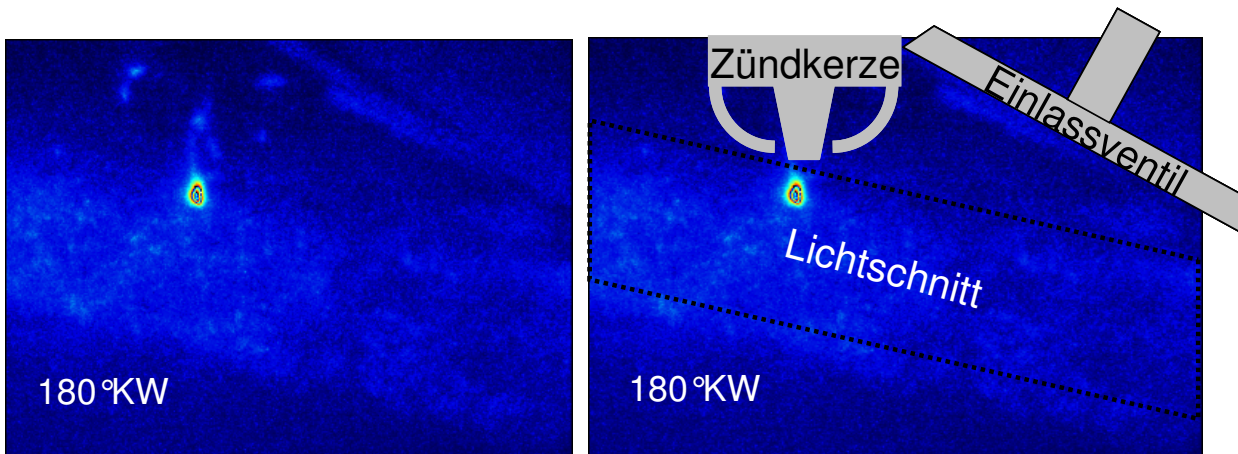


Abbildung 4.10: LIF-Detektion von Realkraftstoff mittels Endoskop, Beispielbild

Die Abbildung 4.10 zeigt ein mittels UV-Endoskop aufgezeichnetes LIF-Beispielbild. Der linke Teil der Abbildung entspricht dem Originalbild, während der rechte Teil zur besseren Orientierung eine Markierung des Lichtschnitts sowie Bauteilbeschriftungen enthält. Die Einkoppelung des Lichtschnitts erfolgt von der linken Bildseite durch die unterhalb der Auslassventile eingebrachte Hülse (siehe Kapitel 4.3.1), die Beobachtung mittels Endoskop erfolgt im rechten Winkel zur Anregung durch die stirnseitige Hülse. Die Einspritzdüse befindet sich außerhalb des Bildausschnitts und liegt mittig unterhalb der Einlassventile. Die Düsen Spitze ist nach unten in Richtung Kolben geneigt.

Da die Messungen mittels Endoskop bei ungefeuerten Motor durchgeführt werden, schlägt sich ein Teil des Kraftstoffs auf den Brennraumwänden nieder. Der Lichtschnitt wird beim Auftreffen auf die gegenüberliegende Brennraumwand diffus gestreut. Durch die Fluoreszenz des flüssigen Kraftstofffilms an den Wänden entsteht ein Signaluntergrund, der die Auswertung des schwachen Signals aus der Gasphase erschwert.

Homogenbetrieb

In Abbildung 4.11 ist eine Bildsequenz des Betriebspunkts 1000 VL von 20°KW bis 290°KW in 10°KW Schritten dargestellt. Bei 20°KW wird ein großer Teil der Sicht in den Brennraum durch die Kolbenschulter verdeckt. Erst bei 40°KW ist die Sicht vollständig freigegeben. Neben der räumlich relativ gleichmäßigen Fluoreszenz des nach der Ausschubphase im Brennraum verbliebenen verdampften Kraftstoffs wird das Bild zu diesem Zeitpunkt durch 2 helle Punkte dominiert. Hierbei handelt es sich um Fluoreszenz des Kraftstofffilms an der Zündkerze und der Brennraumwand, der durch den ungefeuerten Motorbetrieb verstärkt entsteht und direkt durch den Lichtschnitt angestrahlt wird.

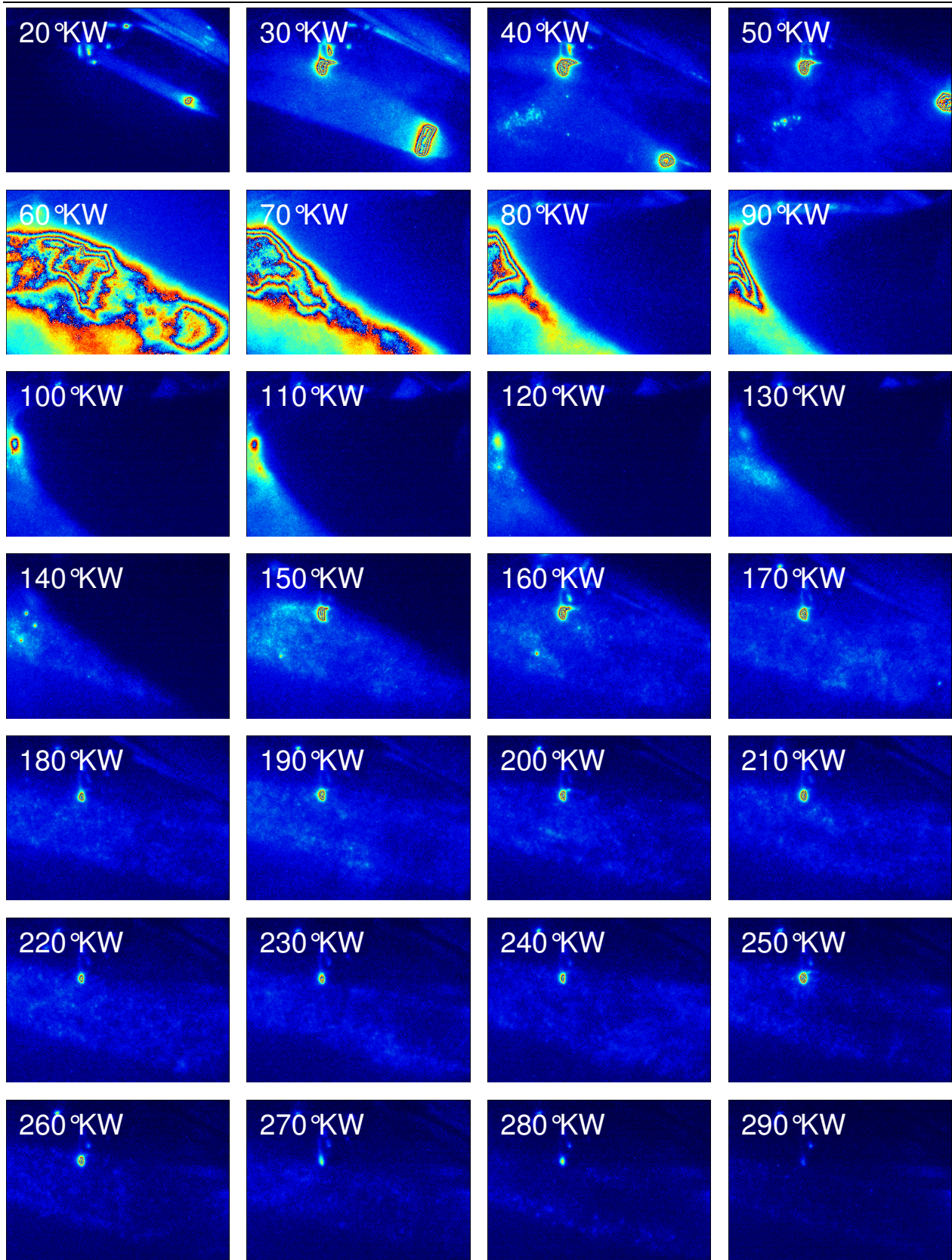


Abbildung 4.11 LIF-Detektion von Realkraftstoff mittels Endoskop, 1000 VL, Bildsequenz von 20 bis 290 °KW

Bei 50°KW ist der Beginn der Einspritzung zu erkennen, deren Verlauf sich in den folgenden Bildern fortsetzt. Die Steuerzeiten der Einlassventile sind in diesem Betriebspunkt zur Reduzierung der Ventilüberschneidung in Richtung spät verschoben. Ein großer Teil des Einspritzstrahls und der frühen Kraftstoffausbreitung wird daher durch das sich öffnende Einlassventil am rechten oberen Bildrand verdeckt, bis das Blickfeld bei 170°KW wieder vollständig freigegeben ist. Zu diesem Zeitpunkt befinden sich noch relativ große, flüssige Kraftstoffwolken im Lichtschnitt. Die daraus resultierende starke Fluoreszenzintensität sorgt für eine über den Bereich des Lichtschnitts hinausgehende Ausleuchtung des Brennraums. Mit fortschreitender Verdampfung des Kraftstoffs und Homogenisierung des Gemisches treten die Grenzen des Lichtschnitts stärker in den Vordergrund, wie man in den Bildern ab Kurbelwinkel 200 erkennen kann. Jenseits von 260°KW wird die Interpretation der Rohbilder zunehmend schwieriger. Hier bedarf es einer nachträglichen Bildbearbeitung, um das Fluoreszenzsignal des verdampften Kraftstoffs vor dem ebenfalls fluoreszierenden Wandfilm differenzieren zu können.

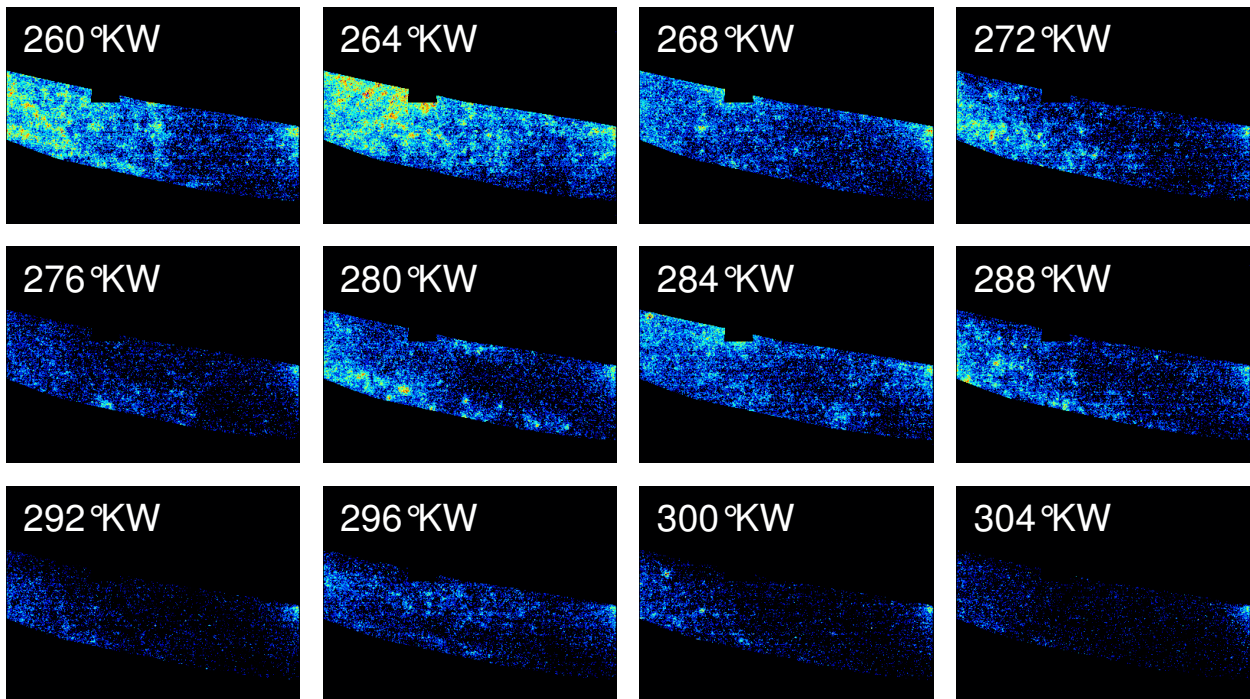


Abbildung 4.12: LIF-Detektion von Realkraftstoff mittels Endoskop, 1000 VL, nachbearbeitete Sequenz

Die Abbildung 4.12 zeigt die Ergebnisse des gleichen Betriebspunkts wie die Bildsequenz aus Abbildung 4.11, allerdings in einer geringeren Kurbelwinkelschrittweite und nach der Bearbeitung. Zunächst wird von jedem Einzelbild ein Referenzbild subtrahiert. Hierzu dient ein Bild, das im oberen Totpunkt aufgenommen wird, da die Sicht in den Brennraum hier durch die Kolbenschulter vollständig verdeckt wird. Anschließend wird ein konstanter Offset von 25 Counts abgezogen, um das allgemeine Pixelrauschen der Kamera zu unterdrücken. Zur besseren Orientierung innerhalb des Bildes werden die Bildbereiche außerhalb des Lichtschnitts maskiert. Der kleine Haken an der oberen Lichtschnittkante maskiert die Elektrodenspitze der Zündkerze und

markiert somit die Brennraummitte. Die resultierenden Bilder weisen eine um Faktoren niedrigere Intensität als die Rohbilder auf, daher muss der Umschlag der Farbskala entsprechend angepasst werden.

Die Abnahme der Signalintensität innerhalb der Bildsequenz ist auf mehrere Ursachen zurückzuführen. Zum einen nimmt der Anteil des flüssigen Kraftstoffs an der Gesamtmenge durch die fortschreitende Verdampfung weiter ab und, da das Fluoreszenzsignal aus der Gasphase aufgrund der geringeren Dichte deutlich schwächer ist als das der Flüssigphase, nimmt die Gesamtintensität ab. Dies ist besonders deutlich zu Beginn der Sequenz während der Einspritzung zu erkennen, wo die Intensität ca. um den Faktor 50 größer ist als zu späteren Zeitpunkten. Zum anderen nimmt die Kraftstoffdichte im Brennraum durch den steigenden Druck während der Kompression zu, so dass ein Teil des Laserlichtes auf dem Weg durch den Brennraum absorbiert wird. Da sich Realkraftstoff aus vielen fluoreszierenden Komponenten zusammensetzt wird auch ein Teil des Fluoreszenzlichtes auf dem Weg zwischen Lichtschnitt und Brennraumfenster von anderen Kraftstoffkomponenten reabsorbiert. Weiterhin steigt mit dem Brennraumdruck die Fluoreszenzlöschung durch Sauerstoff an (Quenching, siehe Kapitel 3.1.1).

Um diese Beobachtung zu verifizieren, wurden eine Reihe von Teillastmesspunkten im Homogenbetrieb mit unterschiedlichen Saugrohrdrücken bei konstanter Einspritzdauer sowie mit variierter Einspritzdauer bei konstantem Saugrohrdruck aufgezeichnet (siehe Tabelle 4.5). Die Abbildung 4.13 zeigt das Verhältnis der räumlich und zeitlich gemittelten LIF-Signalintensitäten innerhalb des Lichtschnitts zu den Zeitpunkten 180°KW und 280°KW. Die Fehlerbalken markieren den 68% Vertrauensbereich.

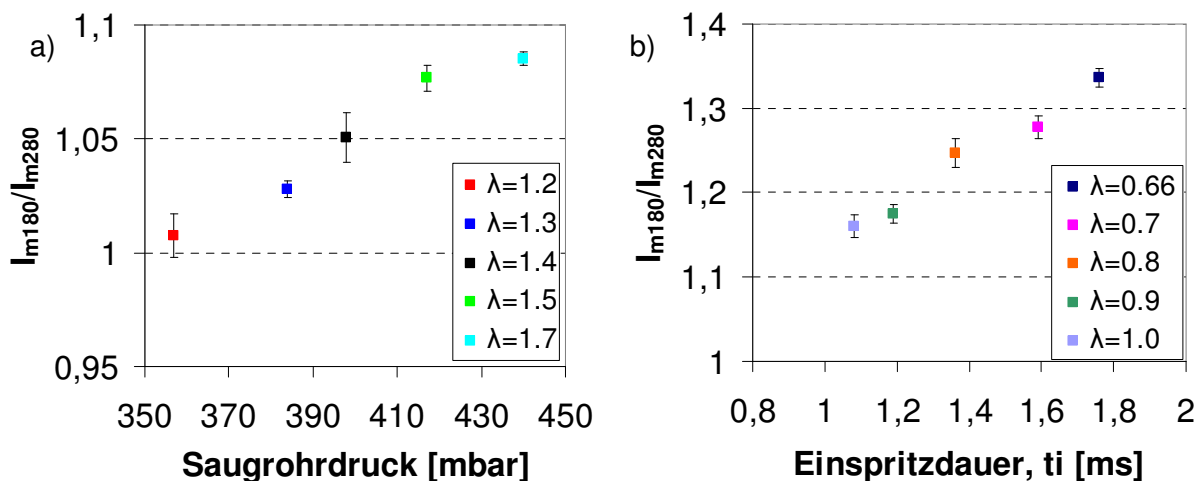


Abbildung 4.13: Verhältnis der mittleren LIF-Signalintensität zu den Zeitpunkten 180° und 280°KW v.OT

Aus der Abbildung 4.13a geht hervor, dass der Quotient der Intensitäten der beiden Zeitpunkte mit steigendem Saugrohrdruck größer wird. Da die Einspritzmenge konstant belassen wurde, hat die Reabsorption der Fluoreszenz hier keinen Einfluss. Weiterhin ist anzunehmen, dass das Verdampfen von flüssigem Kraftstoff und somit der Fortschritt der Gemischbildung zum Zeit-

punkt 180°KW nicht durch den Saugrohrdruck beeinflusst wird, so dass die Zunahme des Quotienten nur durch eine Abnahme der Intensität zum Zeitpunkt 280°KW hervorgerufen werden kann. Dies wird durch die Zunahme der Quenchingrate verursacht, da der Kompressionsdruck mit zunehmendem Saugrohrdruck überproportional ansteigt.

In Abbildung 4.13b ist zu erkennen, dass der Quotient der Intensitäten mit steigender Einspritzdauer und somit zunehmender Kraftstoffmenge im Brennraum zunimmt. Dies kann sowohl durch einen ansteigenden Anteil flüssigen Kraftstoffs zum frühen Zeitpunkt der Intensitätsbestimmung verursacht werden, als auch durch geringere Fluoreszenzintensität aufgrund von Reabsorption während der Kompressionsphase. Anhand der zur Verfügung stehenden Messgrößen ist eine Differenzierung der beiden Effekte nicht möglich.

Das zu Beginn von Kapitel 4 bereits erwähnte Fuel-Air-Ratio-LIF (FARLIF) ist ein Verfahren, das sich die Druckabhängigkeit der Fluoreszenz und des Quenchings zu Nutze macht. In geeigneten Druck- und Temperaturbereichen wird die Fluoreszenzintensität mit zunehmender Teilchendichte durch die ebenfalls zunehmende Quenchingrate kompensiert, so dass die resultierende Fluoreszenzintensität proportional zum Verhältnis von Luft- und Kraftstoffkonzentration ist. Im vorliegenden Fall, der Fluoreszenz von Realkraftstoff im motortechnisch relevanten Druck- und Temperaturbereich, trifft dies nicht zu, da der Quotient der Intensitäten aus Abbildung 4.13 in diesem Fall keine Abhängigkeit vom Saugrohrdruck hätte aufweisen dürfen (siehe auch [50], [49]).

Grundsätzlich weisen die aufgezeichneten Fluoreszenzbilder in der späten Phase der Kompression einen in Lichtschnittausbreitungsrichtung von links nach rechts verlaufenden Intensitätsgradienten auf. Durch den zunehmenden Brennraumdruck steigt die Kraftstoffdichte, so dass die Anregungsintensität durch Absorption des Laserlichtes mit zunehmender Entfernung zum Eintrittsfenster kontinuierlich abnimmt. Weiterhin ist auf einigen Bildern der Sequenz ein Intensitätsminimum in der Mitte des Lichtschnitts auf der rechten Brennraumseite zu erkennen. Dies lässt in diesem Betriebspunkt auf ein Konzentrationsminimum des Kraftstoffs an dieser Stelle schließen. Im Bild zum Zeitpunkt -80°KW ist dies besonders deutlich zu erkennen, da die hellen Kraftstoffwolken am oberen und unteren Lichtschnitttrand ein sicheres Indiz dafür sind, dass es sich hierbei nicht um die allgemeine Abnahme der Intensität durch Absorption handelt.

Schichtbetrieb

Die in Abbildung 4.14 dargestellte Bildsequenz zeigt den Einspritzverlauf und die anschließende Gemischbildung eines geschichteten Teillastbetriebspunkts (siehe Tabelle 4.5). Aus Darstellungsgründen weisen die Bilder unterhalb der strichpunktierten Linie einen um den Faktor zwei geringeren Umfang der Farbskala auf als die Bilder oberhalb der Linie.

Die Einspritzung erfolgt hier zu einem späten Zeitpunkt während der Kompression (siehe Kapitel 0). Zunächst bildet sich eine im Winkel von 15° geneigte Strahlkeule an der Einspritzdüse aus, die im weiteren Verlauf den gesamten sichtbaren Bereich bedeckt und sich weiter in Richtung Zündkerze und Kolbenmulde ausbreitet. Zum Zeitpunkt 313°KW befindet sich ein Großteil der sichtbaren Kraftstoffwolke in der linken Brennraumhälfte jenseits der Zündkerze. Nur ein gerin-

ger Anteil des Kraftstoffs befindet sich auf der rechten Brennraumseite, der dem Bereich der Kraftstoffmulde des Kolbens entspricht. In der Entwicklung der Kraftstoffausbreitung von KW 315 bis zu KW 333 ist das Zusammenspiel der starken Tumbleströmung mit der Kraftstoff- und der Luftmulde sehr gut zu erkennen. Der Kraftstoff wird von unten in die Lichtschnittebene in Richtung der Zündkerze transportiert und mit der angesaugten Luft vermischt, ohne jedoch in die Randbereiche des Brennraums einzudringen. Zum Zeitpunkt 333°KW verdeckt die Kolbenschulter bereits einen Teil des Beobachtungsfensters, so dass eine Beurteilung der Kraftstoffverteilung zum Zündzeitpunkt (340°KW) hier leider nicht möglich ist. Allerdings ist zu erkennen, dass die Verdampfung bereits nahezu abgeschlossen ist und sich die Gemischwolke an der Zündkerze konzentriert.

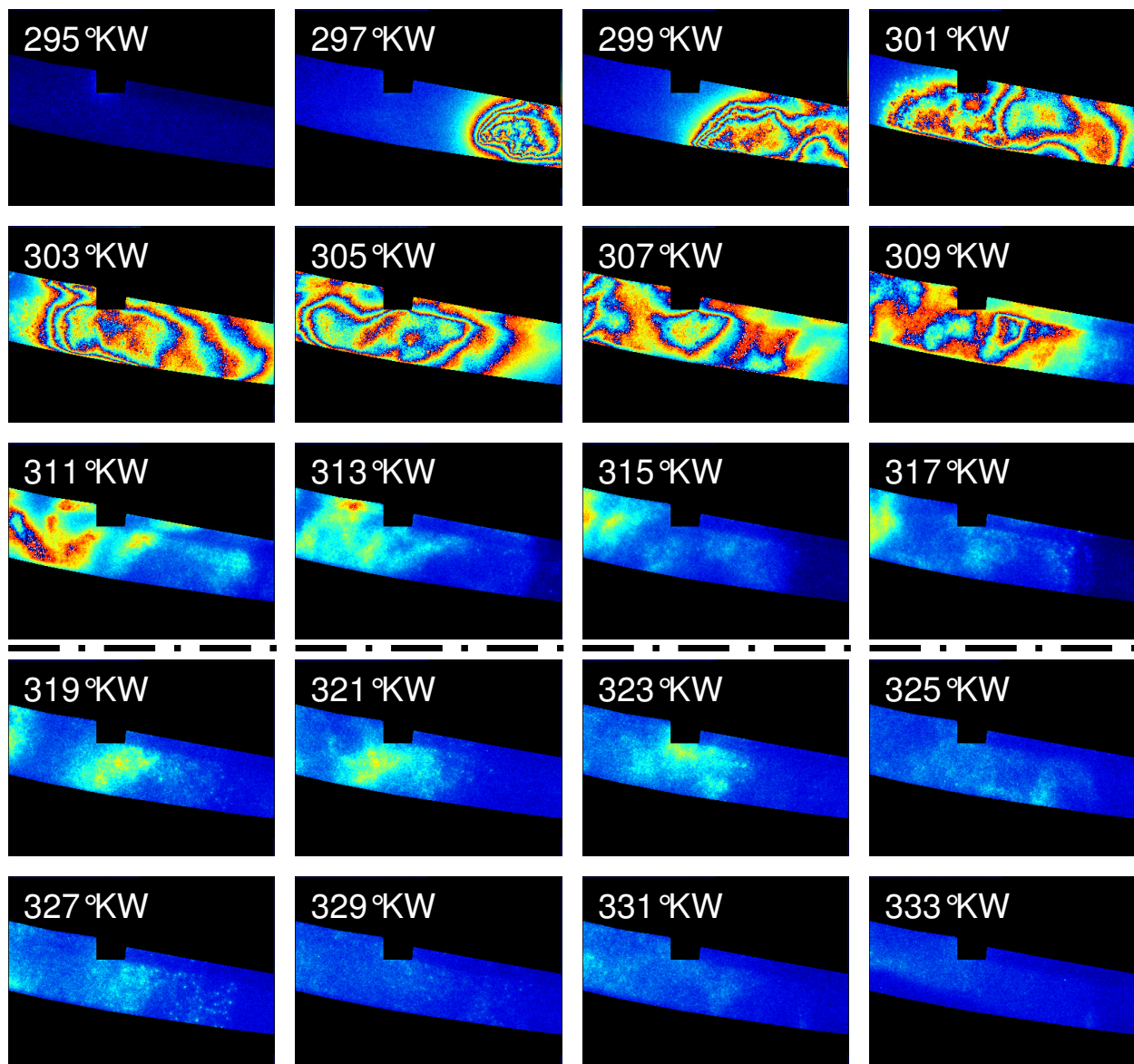


Abbildung 4.14: LIF-Detektion von Realkraftstoff mittels Endoskop, Schichtbetrieb, Einspritzstrahlausbreitung und Verdampfung

4.3.7 Ergebnisse LIF durch minimierten optischen Zugang mittels Zerstreuungslinse

Dem in Abbildung 4.15 dargestellten Volllastbetriebspunkts bei 1000 min^{-1} liegen die gleichen Betriebsparameter zu Grunde wie der mittels Endoskop aufgezeichneten Einspritzsequenz in Abbildung 4.11. Die Beobachtung erfolgt hier allerdings mittels des UV-Kameraobjektivs und der zur Vergrößerung des Blickfelds eingebrachten Zerstreuungslinse. Ein großer Vorteil dieses Verfahrens ist die Möglichkeit, den Motor gefeuert zu betreiben, da hinsichtlich der mechanischen Haltbarkeit der Linse und des zulässigen Temperaturbereiches keinerlei Einschränkungen bestehen.

Die Bildsequenz beginnt vor der Einspritzung bei 20°KW und reicht von der Gemischverdampfung mit anschließender Homogenisierung bis zur Zündung und der anschließenden Verbrennung über den oberen Totpunkt hinaus. Die Bilder der ersten beiden Reihen weisen aus Darstellungsgründen eine andere Farbskala (Faktor zwei größer) aus als die übrigen Bilder und erscheinen daher etwas dunkler.

Zu Beginn der Sequenz (20°KW bis 50°KW) ist, wie auch bei den ungefeuerten Aufnahmen mittels Endoskop, bereits vor der Kraftstoffeinspritzung ein deutliches Fluoreszenzsignal zu detektieren. Da das Signal jedoch auf den Bereich des Lichtschnitts beschränkt ist und keinerlei Hintergrundstrukturen zu erkennen sind, kann es sich hierbei nicht um Fluoreszenz von flüssigen Kraftstoffrückständen an den Brennraumwänden handeln. Unverbrannter Restkraftstoff aus dem vorherigen Verbrennungszyklus scheidet als Ursache ebenso aus, da die nach der Zündung aufgezeichneten Bilder (380°KW bis 410°KW) mit Ausnahme des Verbrennungseigenleuchtens, welches hier schwach ausgeprägt zu den Zeitpunkten 380°KW und 390°KW oberhalb der Kolbenkontur beobachtet werden kann, keinerlei Signal aus dem Brennraum liefern. Der Kraftstoff kann also nur über die sich öffnenden Einlassventile in der frühen Ansaugphase in den Brennraum gelangen. Die Analyse der Ventilsteuerzeiten in diesem Betriebspunkt ergibt, dass die Einlassventile erst nach dem Erreichen des unteren Totpunkts vollständig geschlossen sind. Ein Teil des frischen Gemisches wird demnach zu Beginn der Kompression durch den noch bestehenden Öffnungsspalt in das Saugrohr ausgeschoben und zu Beginn des folgenden Motorzyklus wieder angesaugt.

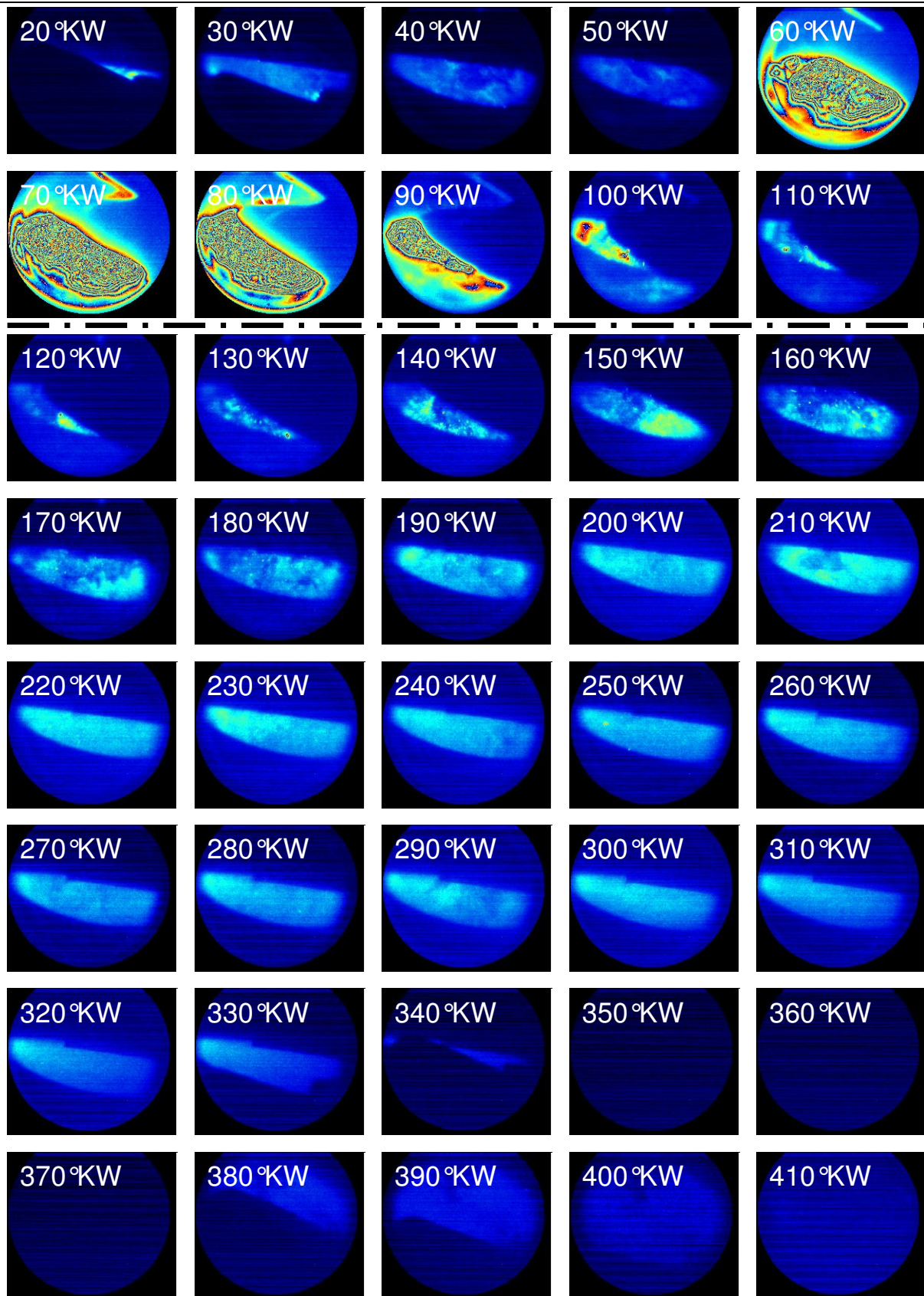
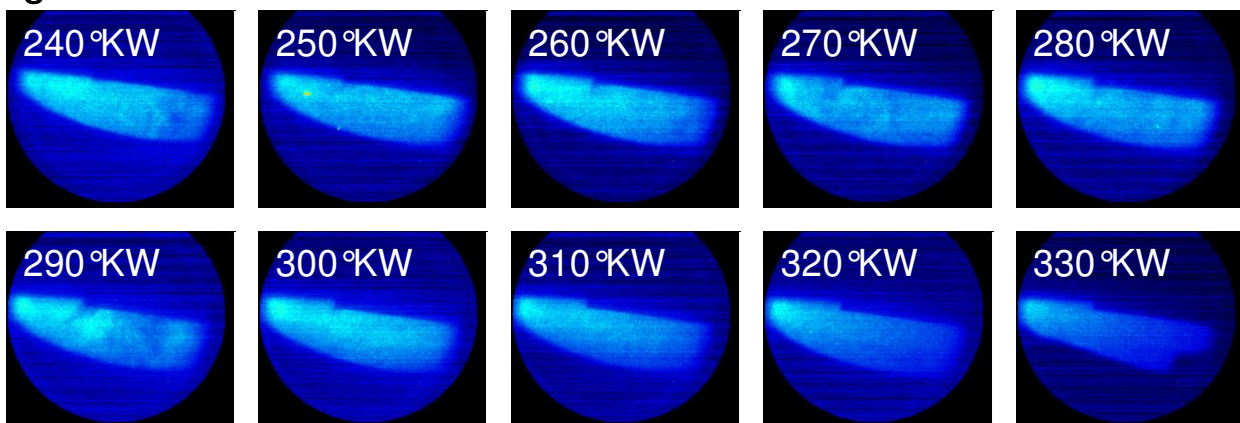


Abbildung 4.15: LIF-Detektion von Realkraftstoff mittels Zerstreuungslinse und Objektiv, Voll-
last gefeuert

Die Abbildung 4.16 zeigt eine Gegenüberstellung des gleichen Vollastbetriebspunktes bei geschlepptem und gefeuertem Motor. Das im Vergleich zu den Bildern aus dem Schleppbetrieb geringere Hintergrundsignal der gefeuerten Betriebspunkte macht sich besonders während der Gemischhomogenisierung positiv bemerkbar. Der Lichtschnitt ist klar vom übrigen Brennraum abzugrenzen und die Strukturen der Kraftstoffwolken treten deutlicher in Erscheinung. Die Gemischhomogenisierung ist im dargestellten Kurbelwinkelbereich im gefeuerten Betrieb stets stärker fortgeschritten als im ungefeuerten Betrieb, was auf das höhere Temperaturniveau des gefeuert betriebenen Motors zurückzuführen ist. Es entstehen weiterhin keine störenden Reflexe an der Zündkerzenspitze und auf der Kolbenoberfläche, da sich dort keine Kraftstoffrückstände befinden und das elastische Streulicht durch den Butyl-Acetat-Filter unterdrückt wird. Dies wird besonders zu späten Kurbelwinkeln ($>310^\circ\text{KW}$) deutlich, da hier die Fluoreszenz des Kraftstofffilms auf der Innenseite der der Beobachtungsrichtung gegenüberliegenden Kolbenschulter im ungefeuerten Zustand das Bild dominiert, während die Bilder aus dem gefeuerten Motorbetrieb nicht beeinträchtigt sind.

gefeuert



ungefeuert

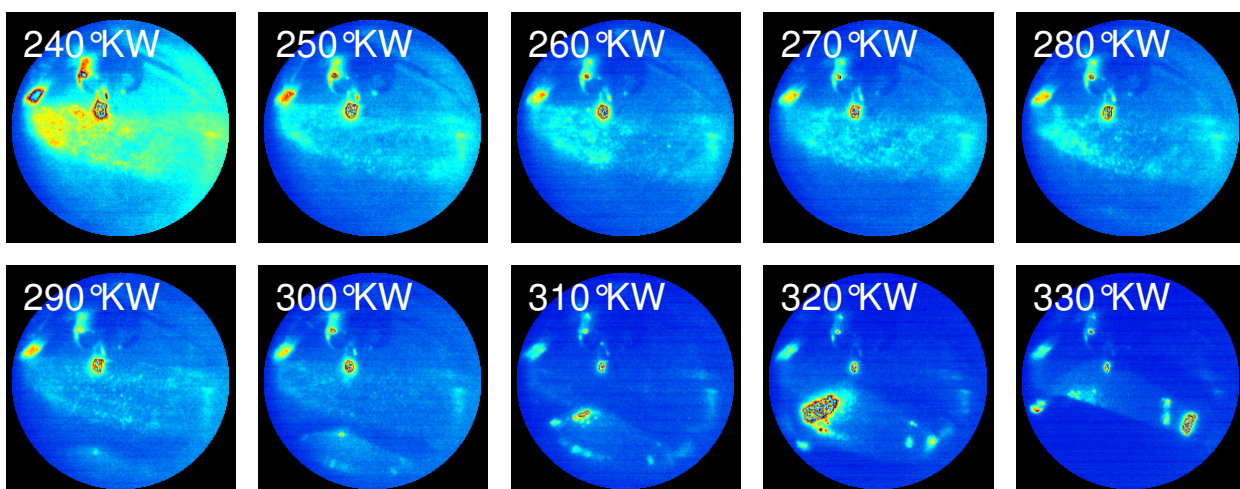


Abbildung 4.16: LIF mittels Zerstreuungslinse und Objektiv, Vergleich gefeuert (oben) – ungefeuert (unten)

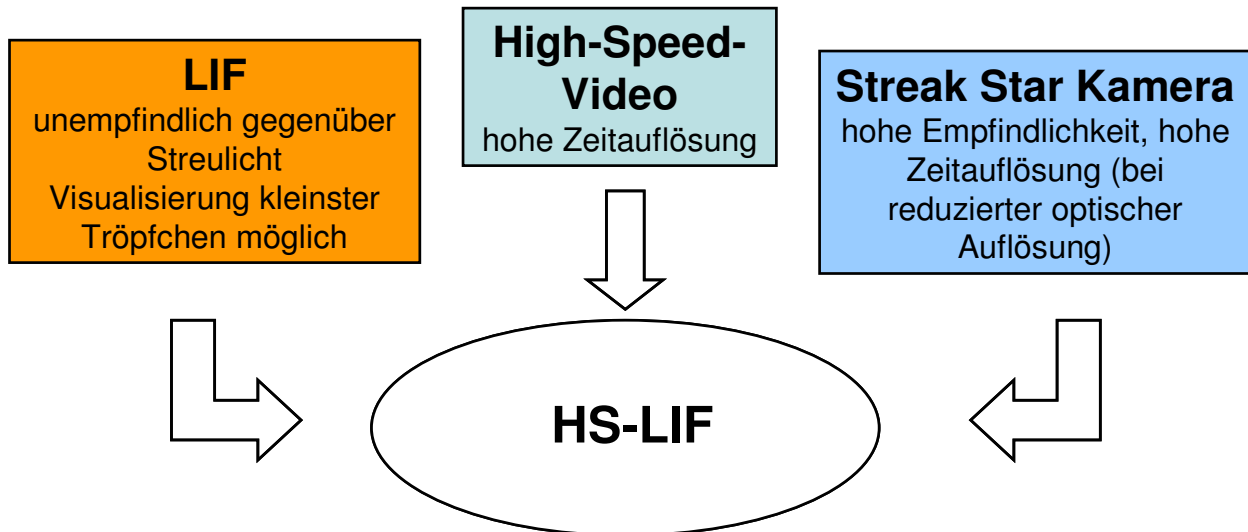
Stellt man die Ergebnisse aus den Versuchen mit dem Endoskop und dem Kameraobjektiv in Verbindung mit der brennraumnahen Zerstreuungslinse gegenüber, so steht dem Nachteil des geringeren Blickfelds bei der Verwendung des Objektivs der deutliche Vorteil der lichtstärkeren und helleren Abbildung entgegen. Ein großer Vorteil ist ebenfalls die Möglichkeit, den Motor dauerhaft gefeuert zu betreiben, was bei der Verwendung des Endoskops aus thermischen Gründen nicht möglich ist. Die Auswertung der gefeuerten Aufzeichnungen hat ergeben, dass sich das Gemischbildungsverhalten signifikant von den ungefeuerten Versuchen unterscheidet. Weiterhin schränkt die Notwendigkeit des Ein- und Ausbaus bei Start und Beendigung des Motorversuchslaufs den praktischen Umgang mit dem Endoskop ein, da der Versuchsraum hierzu bei laufendem Motor von einer Person betreten werden muss, was aus sicherheitstechnischen Gründen zu vermeiden ist. Sofern der Blickwinkel ausreicht, ist die Visualisierung mittels Zerstreuungslinse und Objektiv dem für diese Untersuchungen eingesetzten Endoskop vorzuziehen.

4.4 LIF mit optimierter Bildfolgerate

Neben dem Bestreben, die thermodynamischen Veränderungen der Versuchsmotoren so gering wie möglich zu halten, ist die Steigerung der zeitlichen Auflösung von Fluoreszenzuntersuchungen ein häufig nachgefragtes Anliegen von Motorenentwicklern. Ziel ist es, Gemischbildungsphänomene durch mehrere Bilder innerhalb eines Zyklus aufzuzeichnen, um diese anschließend analysieren zu können.

Messsysteme zur Hochgeschwindigkeitskinematografie sind von mehreren Messtechnikherstellern kommerziell erhältlich. Diese ermöglichen zeitlich und räumlich hochaufgelöste Messungen des Mie-Streulichts von Partikeln bzw. Kraftstofftröpfchen und stellen ein etabliertes Werkzeug zur Brennverfahrenentwicklung dar [54, 60]. Nachteilig für die Streulichtverfahren im motorischen Einsatz gegenüber LIF-Messungen wirkt sich das stärkere Auftreten von Sekundärlicht aufgrund von Streuung und Reflektionen an den Brennraumwänden aus.

Das Ziel der im Folgenden beschriebenen Untersuchungen ist es, die Vorteile der Hochgeschwindigkeitskinematografie mit denen der laserinduzierten Fluoreszenz zu verknüpfen. Hierzu werden Komponenten zweier Messsysteme zu einem „High-Speed-LIF-System“ kombiniert (Abbildung 4.17). Das Ergebnis ist ein zeitaufgelöstes Messverfahren, das unempfindlich gegenüber Streulicht im Motorbrennraum ist und die Visualisierung kleinster Tröpfchen der Kraftstoffeinspritzung ermöglicht.



Ziel: Darstellung der Strahlausbreitung und Gemischbildung im Einzelzyklus

Abbildung 4.17: Konzept High-Speed-LIF

4.4.1 Beschreibung der HS-LIF-Systemkomponenten und experimenteller Aufbau

Das „Standard-LIF“-System von Volkswagen besteht aus einem KrF*-Laser, einer bildverstärkten CCD-Kamera (ICCD) und einem Steuerungs-PC. Die Haupteinsatzfelder des Systems sind Motorprüfstände und Druckkammern zur Gemischbildungs- und Einspritzstrahluntersuchung an Realkraftstoffen. Es stehen zwei verschiedene ICCD-Kameras zur Verfügung, die sich durch das Ausleseverfahren des belichteten Chips unterscheiden. Im so genannten Frame-Transfer-Modus ist der CCD-Chip in zwei Sektionen unterteilt, den Speicherbereich, der von einer Blende verdeckt wird, und den lichtempfindlichen Bereich. Nach einer Belichtung wird das Bild in den Speicherbereich verschoben und anschließend vollständig ausgelesen. Dieser Vorgang nimmt ca. 500 ms in Anspruch, so dass das Gesamtsystem durch den langsamen Ausleseprozess des CCD-Chips lediglich eine Bildaufzeichnungsrate von 2 Hz erreicht und somit nicht für hoch zeit aufgelöste Messungen geeignet ist.

Bei der zweiten Variante handelt es sich um eine Streak-Kamera. Diese ist mit einer verstellbaren Blende über dem Chip ausgestattet, so dass der lichtempfindliche Bereich zwischen einer Zeile und der halben Chiphöhe frei variiert werden kann. Der verdeckte Teil des Chips dient in diesem Fall als Speicherbereich. Im „Streak-Modus“ werden die belichteten Zeilen des Chips kontinuierlich in den Speicherbereich verschoben, bis dieser vollständig gefüllt ist.

Die Abbildung 4.18 zeigt das Ablaufschema des so genannten „Framing-Modus“. Auch hier beschränkt die verstellbare Blende den zu belichtenden Teil des CCD-Chips. Der Transfer der belichteten Zeilen erfolgt jedoch nicht kontinuierlich, sondern nach jeder einzelnen Belichtung um eine vorgegebene Anzahl von Zeilen. Die Verschiebung der Teilbilder dauert pro Zeile lediglich 0,3 μ s, daher kann eine kurbelwinkelsynchrone Bildaufzeichnung in weiten Drehzahlbereichen erreicht werden. Die maximal mögliche Anzahl von Teilbildern richtet sich nach deren Höhe und

ist der messtechnischen Aufgabe anzupassen. Für die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen wurden 5 Teilbilder pro Zyklus aufgezeichnet, da das resultierende Bildformat dem Format des Glasringausschnitts dann sehr nahe kommt und eine gute Chipausnutzung erzielt wird. Die Teilbildhöhe beträgt 110 Pixel und liefert somit noch eine ausreichende Ortsauflösung.

Im Anschluss an die Belichtung des letzten Teilbildes wird der Chip vollständig ausgelesen. Dieser Vorgang dauert ca. 150 ms, so dass die Kamera nicht in der Lage ist, Sequenzen aus unmittelbar aufeinander folgenden Motorzyklen aufzuzeichnen.

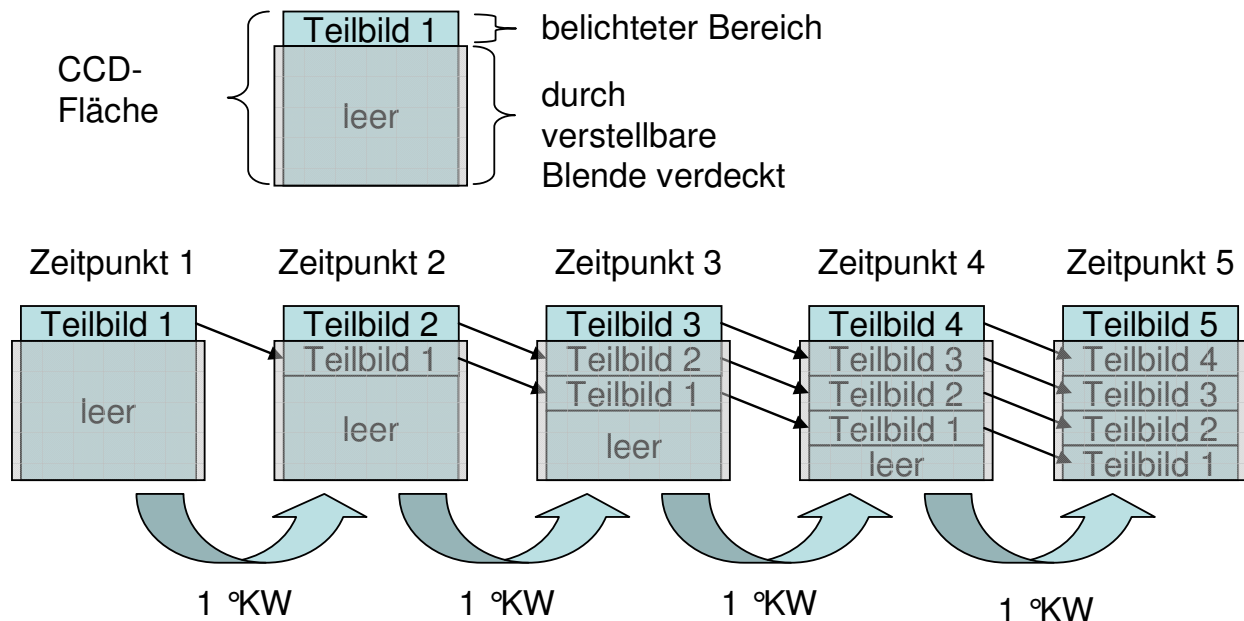


Abbildung 4.18: Funktionsschema der Streak-Kamera im Framing-Modus

Zur Fluoreszenzanregung des Kraftstoffs wird bei Volkswagen bislang ein KrF*Excimer-Laser mit einer maximalen Repetitionsrate von 20 Hz eingesetzt. Bei 2000 min^{-1} wird für eine kurbelwinkelsynchrone Bildaufzeichnung eine Repetitionsrate von 12 kHz benötigt, die zum momentanen Zeitpunkt und mit ausreichender Leistung nur durch Nd:YAG und Nd:YLF-Laser erzielt werden können. Da ein Nd:YLF-Laser bei Volkswagen zur Hochgeschwindigkeits-Kinematografie eingesetzt wird, wurde dieser in das Messsystem zur zeitaufgelösten LIF-Messung integriert. Frequenzverdoppelt emittiert er mit einer Wellenlänge von 527 nm.

	Compex 102	Evolution 30
Aktives Medium	KrF	Nd:YLF
Wellenlänge	248 nm	527 nm
Repetitionsrate	max. 20 Hz	1-20 kHz
Pulsenergie	5 – 330 mJ	30 mJ – 1,5 mJ

Tabelle 4.6: Übersicht von Laserlichtquellen für LIF-Untersuchungen

Die Tabelle 4.6 enthält die wichtigsten Daten der verwendeten Laserlichtquellen.

Ottokraftstoff kann aufgrund seiner Transparenz für sichtbares Licht nicht mit einer Wellenlänge von 527 nm zur Fluoreszenz angeregt werden, daher muss ein Tracer hinzugefügt werden. Die Wahl trifft hier auf in Ethanol gelöstes Rhodamin 6G, da Ethanol mit bis zu 5% in handelsüblichem Ottokraftstoff vorkommt, der Siedepunkt innerhalb der Siedelinie des Kraftstoffes liegt und Rhodamin ein weit verbreiteter Laserfarbstoff mit hoher Quantenausbeute ist [61].

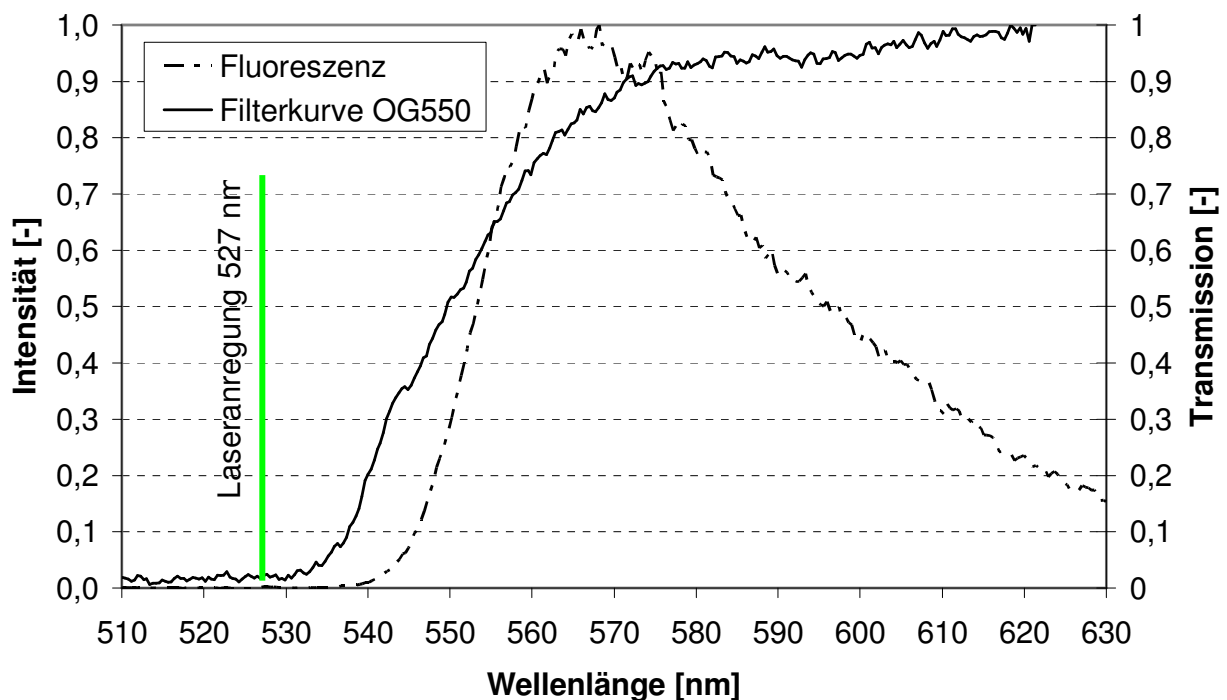


Abbildung 4.19: Fluoreszenzspektrum von 0,023 g/l Rhodamin 6G gelöst in Ethanol und gemischt mit Eurosuper

Da das Rhodamin nur in gelöster Form fluoresziert und nach der Verdampfung des Ethanols in kristalliner Form vorliegt, stammt das Fluoreszenzsignal nach der Laseranregung nur aus der Flüssigphase. Die Abbildung 4.19 zeigt das durch ein Farbglas (OG550) gefilterte Emissions-

spektrum von Rhodamin 6G, gelöst in Ethanol und Eurosuper. Das elastische Streulicht der Anregungswellenlänge von 527 nm wird sicher unterdrückt, so dass die resultierende Lichtintensität ausschließlich auf Fluoreszenz und nicht auf Mie-Streuung zurückzuführen ist. Die Tracerkonzentration beträgt 0,023 g/l und liegt damit um ca. ein Drittel unterhalb der Konzentration, bei der nach Düwel et al. Selbstabsorption eine weitere Zunahme der Fluoreszenzintensität verhindert [62].

Die Abbildung 4.20 zeigt die Skizze des Versuchsaufbaus am Motorprüfstand. Die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen wurden an einem optisch zugänglichen 1,6l-FSI-Motor der Volkswagen Motorenforschung durchgeführt. Der optische Zugang ist als Glasring-Konzept ausgeführt, das bereits in Kapitel 4.2 erläutert wurde und eine großflächige Betrachtung des Brennraums von drei Seiten zulässt. Es kommen zwei Messverfahren parallel zum Einsatz. Zum einen das „Standard-LIF“-System, das bereits in Kapitel 4.3.3 erläutert wurde und zum anderen das „HS-LIF“-System für Fluoreszenzuntersuchungen von Rhodamin als Tracer durch Laseranregung bei 527 nm. Die nebeneinander montierten Kameras der beiden Messsysteme schließen einen Winkel von ca. 10° ein und blicken stirnseitig in den Brennraum. Der Butyl-Acetat-Filter bzw. das OG550 Farbglass ist jeweils unmittelbar auf das Objektiv montiert. Die Einkoppelung des Laserlichts erfolgt in Motorquerrichtung und für beide Systeme getrennt von jeweils einer Seite. Die Dicke der Lichtschnitte beträgt in der Brennraummitte ca. 1 mm.

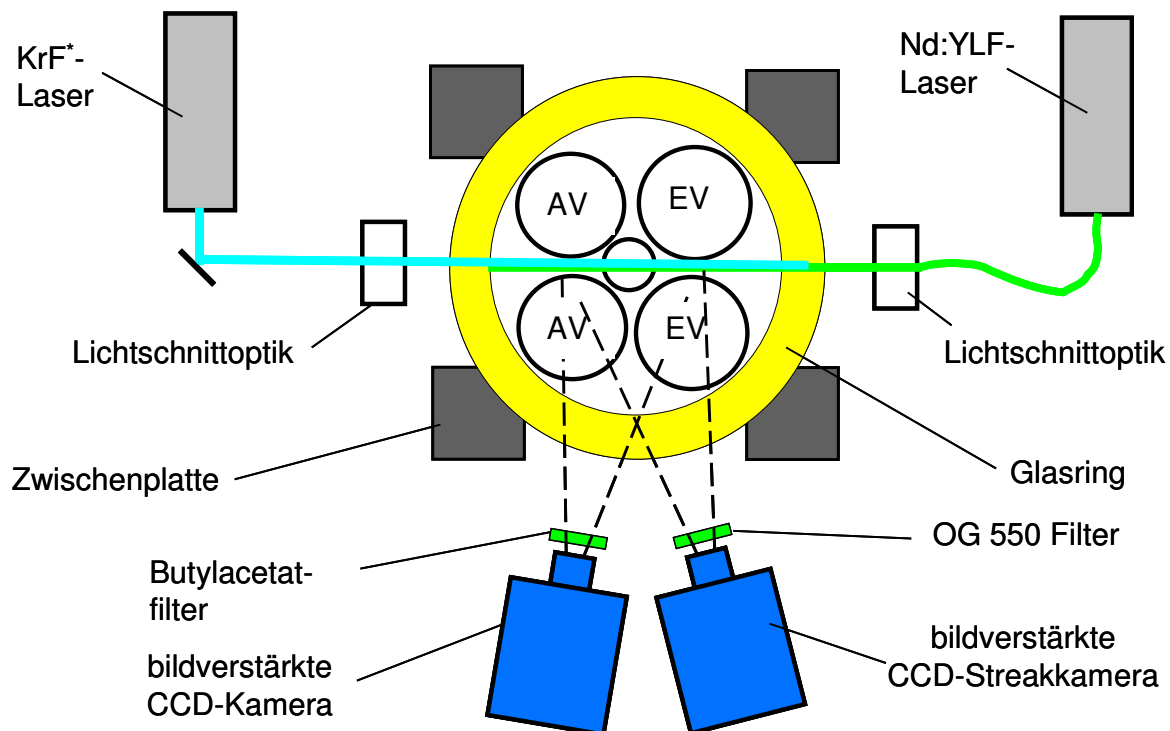


Abbildung 4.20: Skizze des Versuchsaufbaus für parallele LIF und HS-LIF-Messungen

Um eine synchrone Bildaufzeichnung zu erzielen, werden beide Systeme durch Triggerleitungen miteinander verbunden. Die Abbildung 4.21 zeigt schematisch die Verknüpfung der beiden Systeme, wobei das „HS-LIF“-System die Rolle des „Masters“ übernimmt und die Aufnahmebereit-

schaft über ein so genanntes „Arming“-Signal an den Sequencer und das „Standard-LIF“-System sendet. Diese Art der Verschaltung ist vorteilhaft, da letzteres System innerhalb des Motorzyklus über einen synchronisierten Zeitgeber frei ansteuerbar ist und sich somit einfacher fremdsteuern lässt als das „HS-LIF“-System. Dessen Aufnahmezeitpunkt der Bildsequenz wird über die kurbelwinkelsynchrone Pulsfolge der Triggerbox bestimmt, deren Eingangssignale von dem an der Kurbelwelle befestigten Winkelmarkengeber stammen und das feste Bezugssystem zur Kurbelwinkelstellung darstellen. Das LIF-Einzelbild wird bei anliegendem Arming-Signal durch einen Softwaretrigger ausgelöst.

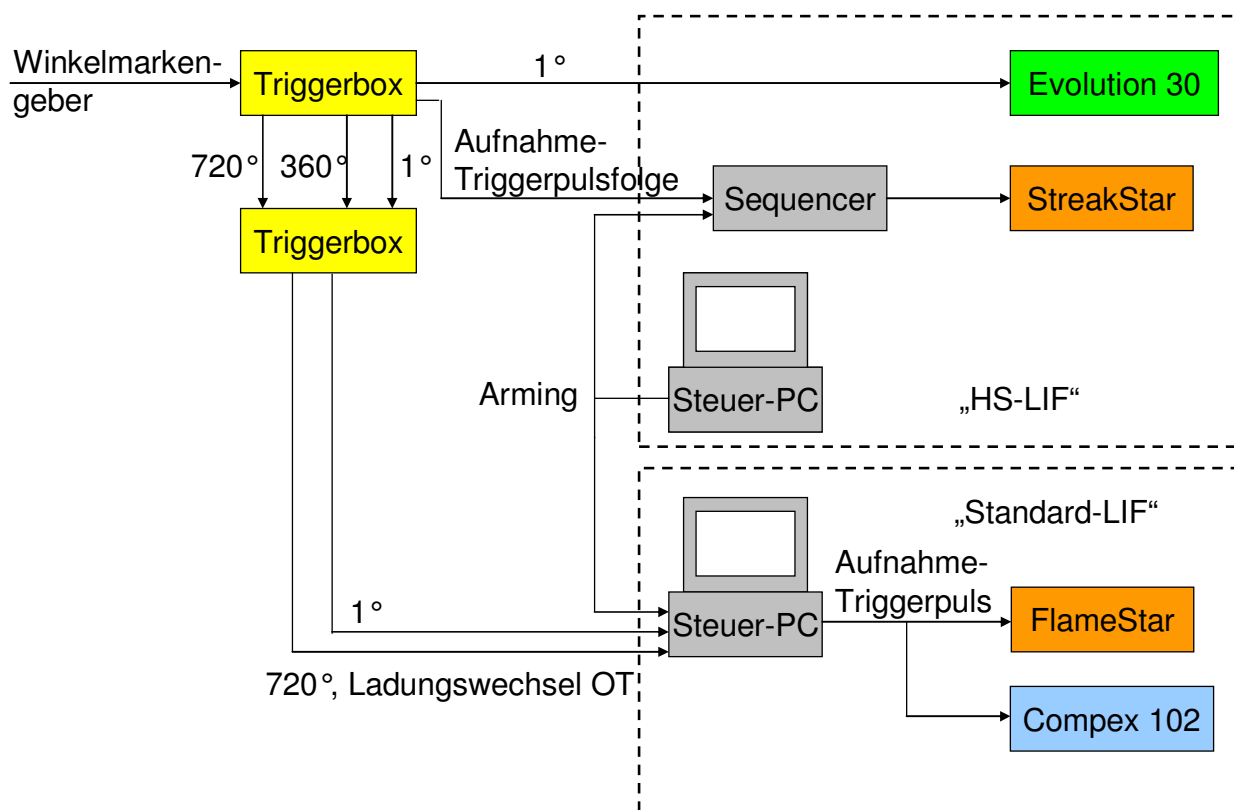


Abbildung 4.21: Triggerschema Prüfstandsversuche HS-LIF

4.4.2 Betriebspunkte und Durchführung

Das Messprogramm umfasst insgesamt zwei verschiedene Betriebspunkte im geschleppten Motorbetrieb, die einem Vollastbetriebspunkt im Homogenbetrieb sowie einem Teillastbetriebspunkt im Schichtbetrieb entsprechen. Die Betriebsparameter sind Tabelle 4.7 zu entnehmen.

Die Bildaufzeichnung startet kurz vor Beginn der Einspritzung und dauert bis spätestens 336°KW, wenn der Kolben den Bereich des Glasrings überdeckt und das Bild abschattet. Dieser Bereich wird in 5°KW-Abschnitte eingeteilt, in denen das LIF-System zu jedem Kurbelwinkel im Schichtbetrieb elf bzw. sechs Bilder im Homogenbetrieb aufnimmt und dann mit dem nächsten Kurbelwinkel fortfährt. Das HS-LIF-System nimmt immer die gleiche 5er-Sequenz auf, so dass das parallel aufgezeichnete Bild innerhalb der Bildsequenz fortschreitend wechselt. Abbildung 4.22 verdeutlicht diesen Sachverhalt anhand einer Skizze. Die schwarzen Striche symbolisieren

den Aufnahmezeitpunkt eines Teilbilds des HS-LIF-Systems auf einer fortlaufenden Zeitachse. Der Aufnahmezeitpunkt des LIF-Systems ist als roter Strich dargestellt. Zwischen den einzelnen Aufnahmesequenzen vergehen mehrere Zyklen, da die CCD-Chips in dieser Zeit ausgelesen werden.

Betriebspunkt	2000 TL	2000 VL
Last (pme)	2 bar	Volllast
Zündwinkel	336 °KW	352 °KW
Einspritzzeitpunkt ⁷	303 °KW	100 °KW
Einspritzdauer	0,96 ms	3,68 ms
Raildruck	90	80
Saugrohrdruck	930 mbar	1000 mbar

Tabelle 4.7: Betriebspunktübersicht HS-LIF

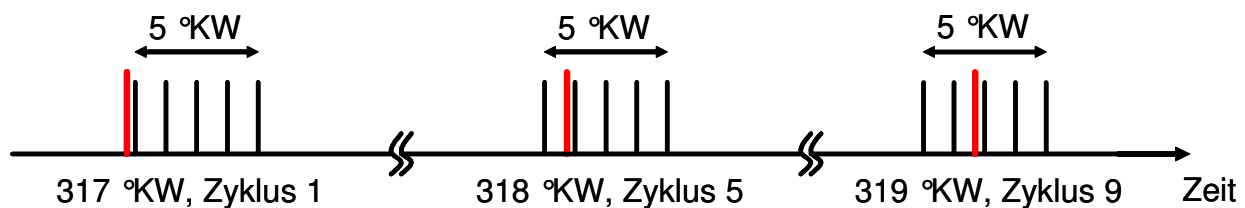


Abbildung 4.22: Relative Lage der Bildaufzeichnungsmomente

Die Aufnahme des LIF-Bildes erfolgt ca. 10 µs vor dem HS-LIF-Bild, damit der Laserpuls des UV-Lasers nicht in die Belichtungszeit der StreakStar-Kamera fällt und die Fluoreszenz des Kraftstoffs das Bild beeinflusst.

Zu jedem Betriebspunkt wird eine Referenzbildreihe mit identischen Aufnahmeparametern jedoch ohne Einspritzung aufgezeichnet. Diese Bilder stellen den Signaluntergrund dar und werden anschließend gemittelt und von der HS-LIF-Sequenz subtrahiert.

Die Abbildung 4.23 zeigt beispielhaft ein zusammengefügtes Ergebnisbild der synchron aufgenommenen LIF- und HS-LIF-Bilder. Das Ergebnisbild besteht aus sechs übereinander angeordneten Teilbildern. Das oberste Bild wird mit dem Standard-LIF-System aufgezeichnet. Der Auf-

⁷ Im geschichteten Teillastbetrieb wird der Zeitpunkt durch das Ansteuerende (ASE) der Einspritzung definiert. Im homogenen Vollastbetrieb bezieht sich der Zeitpunkt auf den Ansteuerbeginn (ASB)

nahmezeitpunkt wird in der oberen linken Ecke angegeben. Aufgrund der unterschiedlichen Chipgrößen der beiden Kamerasysteme ist der Abbildungsmaßstab geringfügig verschieden. Der weiße Rahmen innerhalb des Bildes kennzeichnet den mit dem HS-LIF-Bild übereinstimmenden Bildausschnitt. Die unteren fünf Teilbilder stellen in chronologischer Reihenfolge von oben nach unten die HS-Bildsequenz dar. Das weiß umrahmte Bild, hier Kurbelwinkel 302°KW v.OT, ist zeitgleich zum oben dargestellten LIF-Bild aufgezeichnet.

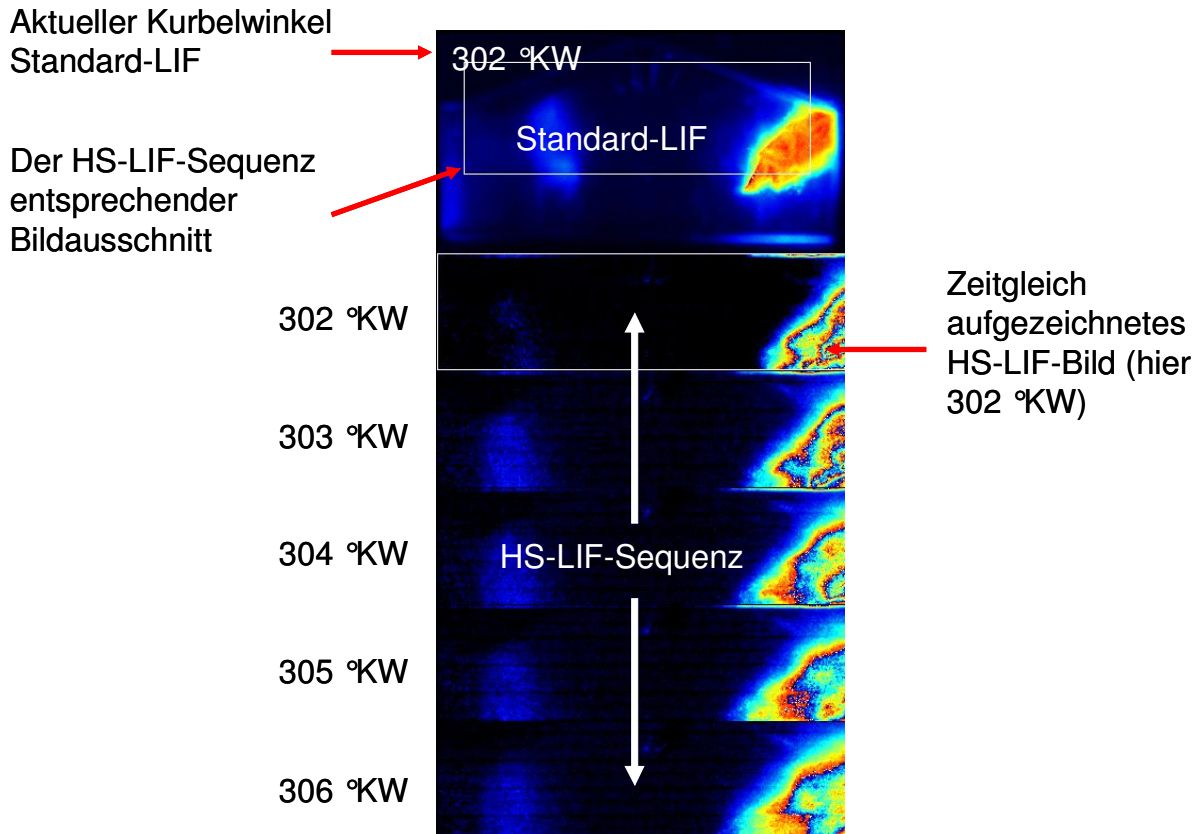


Abbildung 4.23: Beispielbild, Gegenüberstellung von LIF- und HS-LIF-Bild

Die unbearbeiteten Rohbilder der HS-LIF-Sequenz weisen deutlich geringere Lichtintensitäten auf als die Bilder des Standard-LIF-Systems. Um diese in einem gemeinsamen Bild darstellen zu können, bedarf es einer individuellen Anpassung der Intensität. Hierzu werden die HS-LIF-Bilder mit einer für die gesamte Sequenz gewählten Konstanten multipliziert.

4.4.3 Vergleich Kraftstoff-LIF mit High-Speed-LIF (HS-LIF)

Die Abbildung 4.24 zeigt eine Gegenüberstellung der LIF- und HS-LIF-Bilder exemplarisch zu sechs verschiedenen Zeitpunkten für einen Teillast Schichtbetriebspunkt bei 2000 min^{-1} . Zu allen dargestellten Zeitpunkten herrscht eine gute qualitative Übereinstimmung zwischen der Form der Gemischwolke im LIF-Bild und in der HS-LIF-Sequenz.

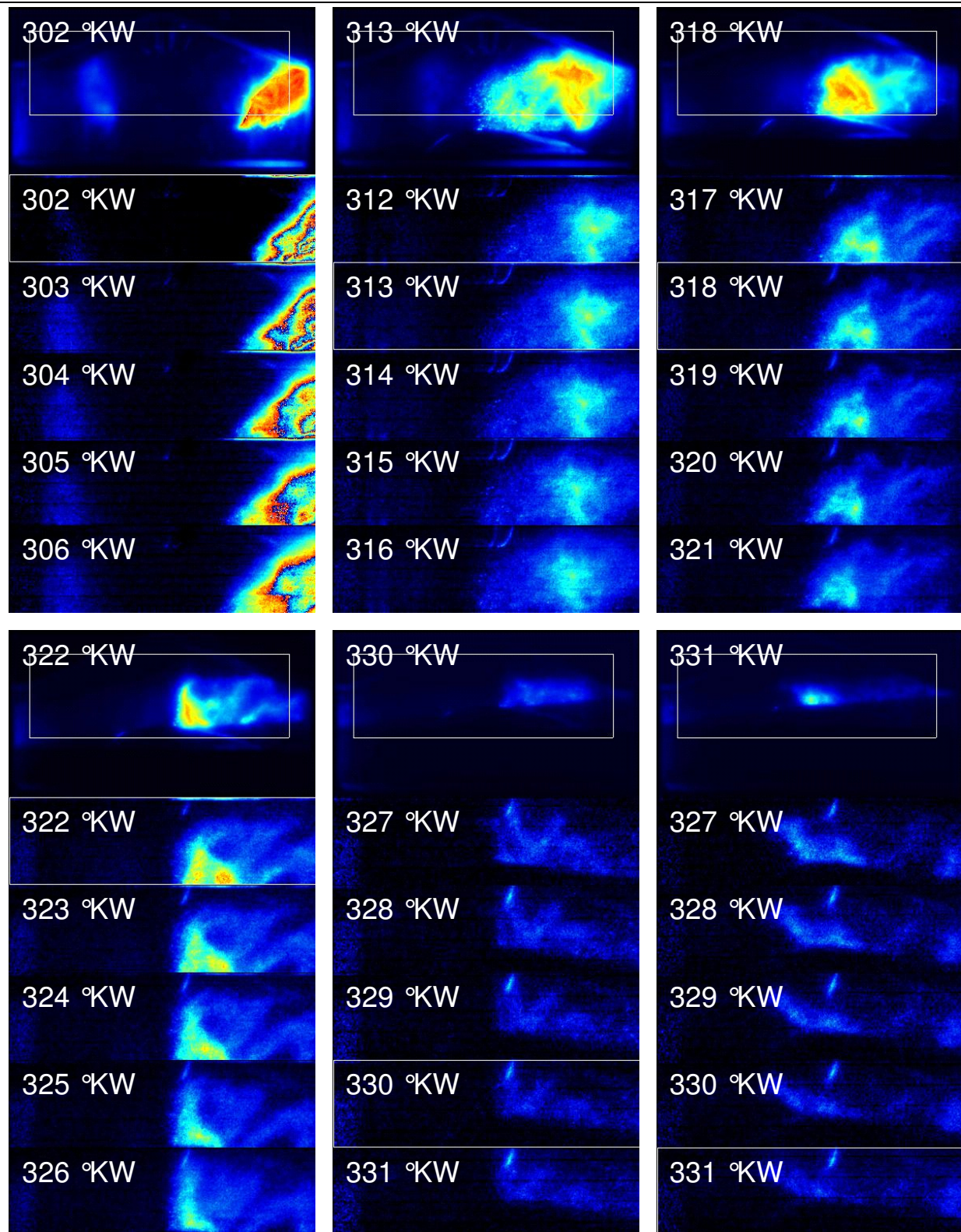


Abbildung 4.24: Schichtbetrieb, Vergleich LIF – HS-LIF, 2000 TL, Single Shot

Die Aufzeichnung der HS-LIF-Sequenz ermöglicht nun die Analyse der Einspritzstrahlausbreitung innerhalb des 5 μ s-Fensters. Die Bildsequenz um den Zeitpunkt 322 μ s zeigt eine ausgeprägte Rotation der Gemischwolke innerhalb der rechten Brennraumseite im Bereich

der Kraftstoffmulde mit einer sehr deutlichen Umlenkung des Kraftstoffs in Richtung Zündkerze (vergleiche Kapitel 2.3).

Ein Vergleich der Bildsequenzen zu den Zeitpunkten 330 °KW und 331 °KW zeigt einen sehr unterschiedlichen Verlauf der Kraftstoffwolke zu späten Zeitpunkten innerhalb der Sequenz. In der ersten Bilderreihe (330 °KW) wird der Kraftstoff in Richtung Zündkerze umgelenkt und breitet sich nicht in den linken Brennraumbereich aus. In der Sequenz um das LIF-Bild zum Zeitpunkt 331 °KW weht die Kraftstoffwolke an der Zündkerze vorbei in den linken Brennraumteil und breitet sich deutlich flacher aus, obwohl die Ausgangsposition beider Sequenzen zum Zeitpunkt 327 °KW ähnlich ist. Bei stroboskopischer Betrachtung fehlt die Möglichkeit die Entwicklung innerhalb einer Sequenz bei der Interpretation der Bilder zu berücksichtigen, daher bietet das HS-LIF-Verfahren deutliche Vorteile bei der Gemischbildungsanalyse.

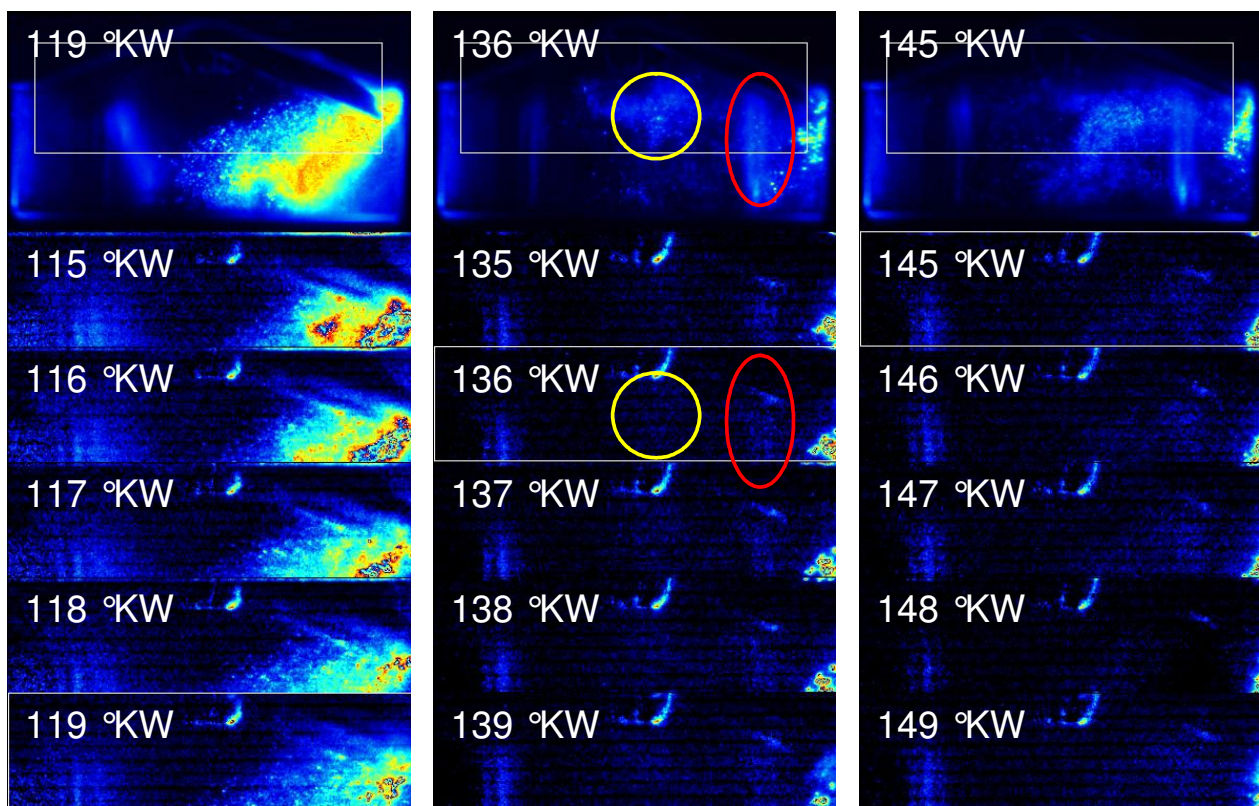


Abbildung 4.25: Homogenbetrieb, Vergleich LIF – HS-LIF, 2000 VL

Die Abbildung 4.25 zeigt eine vergleichende Bildsequenz aus dem Homogenbetrieb mit frühem Einspritzbeginn. Zum Zeitpunkt 119 °KW ist der Einspritzstrahl am rechten Bildrand bereits voll ausgebildet. Wie im Schichtbetrieb stimmt auch hier die Silhouette des Strahlkegels zwischen LIF- und HS-LIF-Bild gut überein. Zum in der Bildmitte dargestellten Zeitpunkt ist die Einspritzung bereits beendet und die Kraftstoffverdampfung fortgeschritten. Während das LIF-Bild deutliche Umrisse einer Gemischwolke (siehe gelber Kreis) zeigt, ist auf den Bildern der HS-LIF-Sequenz nur noch ein schwacher Kontrast gegenüber dem Signaluntergrund zu erkennen. Die Intensität des in rot gekennzeichneten Lichtreflexes im Glasring liegt auf demselben Niveau, so dass eine Unterscheidung im Einzelbild nicht möglich ist, sondern nur durch die ortsfeste Lage

des Reflexes beim Vergleich mehrerer Bilder zu differenzieren ist.

Zum Zeitpunkt 145°KW ist ebenfalls nur noch eine sehr geringe Signalintensität zu erkennen. Bilder, die zu späteren Zeitpunkten aufgenommen wurden, zeigen mit Ausnahme einzelner großer Tropfen nur noch den Signalhintergrund, der durch den flüssigen Kraftstofffilm auf den Brennraumfenstern entsteht sowie das Rauschen der Pixel, das durch die hohe Verstärkung des Eingangssignals entsteht. Eine Auswertung der Einzelbildsequenzen zur Beurteilung der Gemischbildung ist daher nicht mehr möglich.

4.4.4 Vergleich HS-Streulicht – HS-LIF

Da die Detektion der Gasphase konzeptbedingt nicht möglich ist, wird im Folgenden untersucht, inwieweit sich die Ergebnisse der HS-LIF-Untersuchungen von HS-Streulichtuntersuchungen unterscheiden.

Hierzu wird das OG550 Filter aus dem Versuchsaufbau (siehe Abbildung 4.20) entfernt, so dass sich die aufgezeichnete Signalintensität nun aus einem starken Streulichtanteil und einem geringen Fluoreszenzanteil zusammensetzt. Das Standard-LIF-System zeichnet nach wie vor Fluoreszenzbilder auf und dient als Referenz. Die Abbildung 4.26 zeigt eine Gegenüberstellung des HS-LIF und des HS-Streulichtbildes für 3 verschiedene Zeitpunkte. Es handelt sich dabei um Mittelwerte aus 55 Einzelbildern von denen der Signaluntergrund bereits abgezogen ist. Die ohne Filter aufgezeichneten Bilder weisen stärkere Reflexe an der Glasringoberfläche sowie an der Zündkerze auf als die mit Filter aufgezeichneten Bilder. Weiterhin beschränkt sich die örtliche Auflösung im Fall der Fluoreszenzmessungen stärker auf die Lichtschnittebene als bei den Streulichtmessungen, da hier die Sekundärlichteffekte, die zu Beleuchtung der Kraftstoffwolke außerhalb der Lichtschnittebene führen, schwächer sind.

Abgesehen davon weisen die Einspritzverläufe keine signifikanten Unterschiede im Signalverlauf an den Kanten des Einspritzstrahls auf.

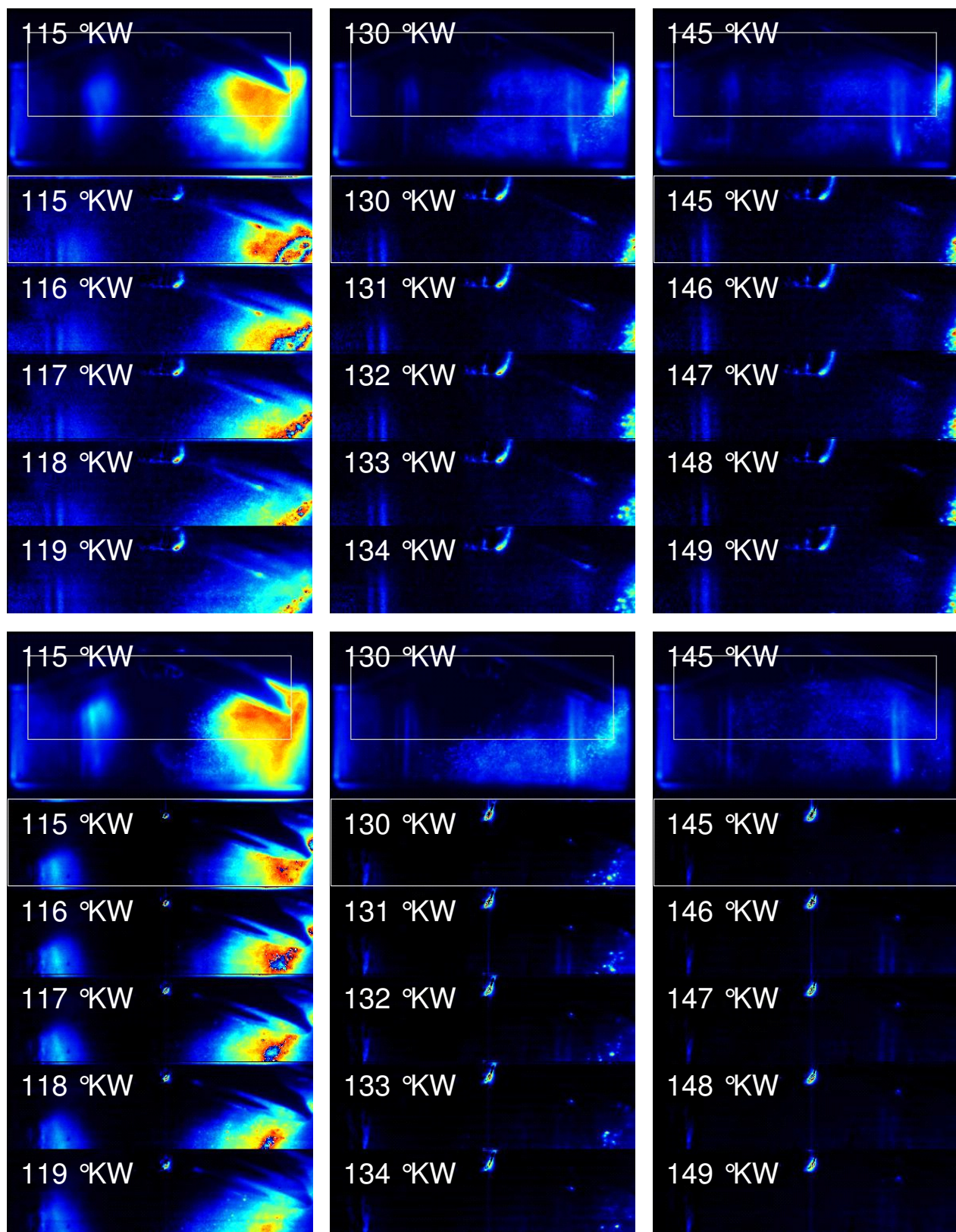


Abbildung 4.26: Vergleich HS-Sequenzen LIF (oben) gegenüber Streulicht + LIF (unten)

5 Gemischbildungsanalyse mittels Absorptionsspektroskopie

Mit LIF wurde die Gemischbildung qualitativ und zweidimensional untersucht. Es wurden Ansätze und Verfahren zur Minimierung optischen Zugänge wie auch zur Erhöhung der Zeitauflösung realisiert. Absorptionsmessverfahren eignen sich ebenfalls zum Nachweis von Kohlenwasserstoffverbindungen und sind daher vielfach zur Bestimmung der Kraftstoffkonzentration in der Nähe der Zündkerze eingesetzt worden. Die Verfahren unterscheiden sich hinsichtlich der verwendeten Kraftstoffe, der Lichtquellen und der entsprechenden Detektoren, der Realisierung der Absorptionsstrecke und der Einsatzbedingungen. Letztere lassen sich gliedern in Motoren mit externer und interner Gemischbildung sowie in geschleppte und gefeuerte Untersuchungen. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Absorptionsmessverfahren, das im geschleppten Motorbetrieb angewendet wurde, für den Einsatz in gefeuert betriebenen Motoren weiterentwickelt, um den zeitlichen Verlauf der Kraftstoffkonzentration in der Nähe der Zündkerze zu messen.

Alle nachfolgend beschriebenen Verfahren benötigen zur Messung der Absorption neben einer modifizierten Zündkerze keine weiteren optischen Zugänge zum Brennraum. Daraus resultieren eine nur sehr geringe Beeinflussung der innermotorischen Randbedingungen und eine gute Eignung zur Applikation an seriennahen oder Serien-Motoren.

Hall und Koenig haben ein Verfahren vorgestellt, bei dem eine Halogenlichtquelle in Verbindung mit Faserlichtleitern und einer modifizierten Messzündkerze zur Messung der lokalen Kraftstoffdichteviation (Propan) an der Zündkerze sowohl im geschleppten [63] als auch im gefeuerten Betrieb [34] eines Ottomotors mit externer Gemischbildung verwendet wird. Nishiyama et al. haben bei ähnlichen Experimenten einen He-Ne-Laser als Lichtquelle und verschiedene Kraftstoffe verwendet und den Einfluss der lokalen Gemischzusammensetzung auf die Güte der nachfolgenden Verbrennung untersucht [19, 64]. Thiele hat in [40] ein ähnliches Messsystem aufgebaut und für den Einsatz an geschleppten Motoren ein Näherungsverfahren entwickelt, um die gemessene Absorption in die in der Motorenentwicklung verbreitete Größe für das Luft-Kraftstoff-Verhältnis λ umzurechnen. Der Einsatz an einem direkteinspritzenden Motor hat gezeigt, dass das Verfahren geeignet ist, die Ladungsschichtung während der späten Einspritzphase abzubilden und den Kraftstofftransport zur Zündkerze in der späten Kompressionsphase zu erfassen.

Die im Folgenden beschriebenen Untersuchungen befassen sich zunächst mit Messungen und deren Auswertungen an geschleppt betriebenen Motoren. Anschließend wird die Erweiterung des Messsystems für Untersuchungen an gefeuert betriebenen Motoren vorgestellt. Ein Schwerpunkt liegt in der Entwicklung einer Methode, um aus den Absorptionsdaten mittels eines geeigneten Kalibrierverfahrens das Luft-Kraftstoff-Verhältnis zu bestimmen. Dies geschieht unter Berücksichtigung der motorischen Randbedingungen wie z.B. der Verschmutzung des optischen Zugangs im Betrieb und der Präsenz von Restkraftstoff zum Zeitpunkt der Bestimmung der Referenzintensität.

Beide Verfahren wurden an direkteinspritzenden Ottomotoren sowohl im stöchiometrischen als auch im mageren Betrieb mit Ladungsschichtung eingesetzt. Für die Durchführung von Reihmessungen wurde eine Software entwickelt, die die Versuchsauswertung automatisiert.

5.1 Infrarotabsorptionssensor ohne Zündfunktion

Der nachfolgend beschriebenen Ergebnisse befassen sich zunächst mit Untersuchungen, die im Schleppbetrieb durchgeführt werden. Bei der Entwicklung des verwendeten Sensors wurde dieser Zwischenschritt zum gefeuerten Sensor gewählt, da die motorischen Herausforderungen in Bezug auf Druck und Temperatur bei geschlepptem Motor nicht so groß sind wie bei gefeuerten Untersuchungen. Weiterhin steht aufgrund der fehlenden Zündfunktion mehr Bauraum für die Sensorkomponenten zur Verfügung, was sich positiv auf die Lichtausbeute und somit auf die Signalstärke auswirkt. In Kapitel 5.2 werden anschließend die Ergebnisse aus dem gefeuerten Motorbetrieb erläutert.

5.1.1 Motorische Randbedingungen

Die Untersuchungen im Schleppbetrieb wurden an dem bereits in Kapitel 4.3.1 beschriebenen 4-Zylinder FSI®-Forschungsmotor durchgeführt (Kenndaten siehe Tabelle 4.2).

Allgemein	
Motordrehzahl	1000 min ⁻¹ , 2000 min ⁻¹
Lastpunkt	1 bar – 2 bar
Zündzeitpunkt (bei gezündetem Motor)	340 °KW
Homogenbetrieb	
Saugrohrdruck	320 mbar – 515 mbar
Einspritzzeitpunkt	25 °KW
Einspritzdauer	0,9 ms -1,59 ms
Einspritzdruck	75 bar
Schichtbetrieb	
Saugrohrdruck	680 mbar, 930 mbar
Einspritzzeitpunkt	295 °KW – 325 °KW
Einspritzdauer	0,8 ms – 0,9 ms
Einspritzdruck	75 bar

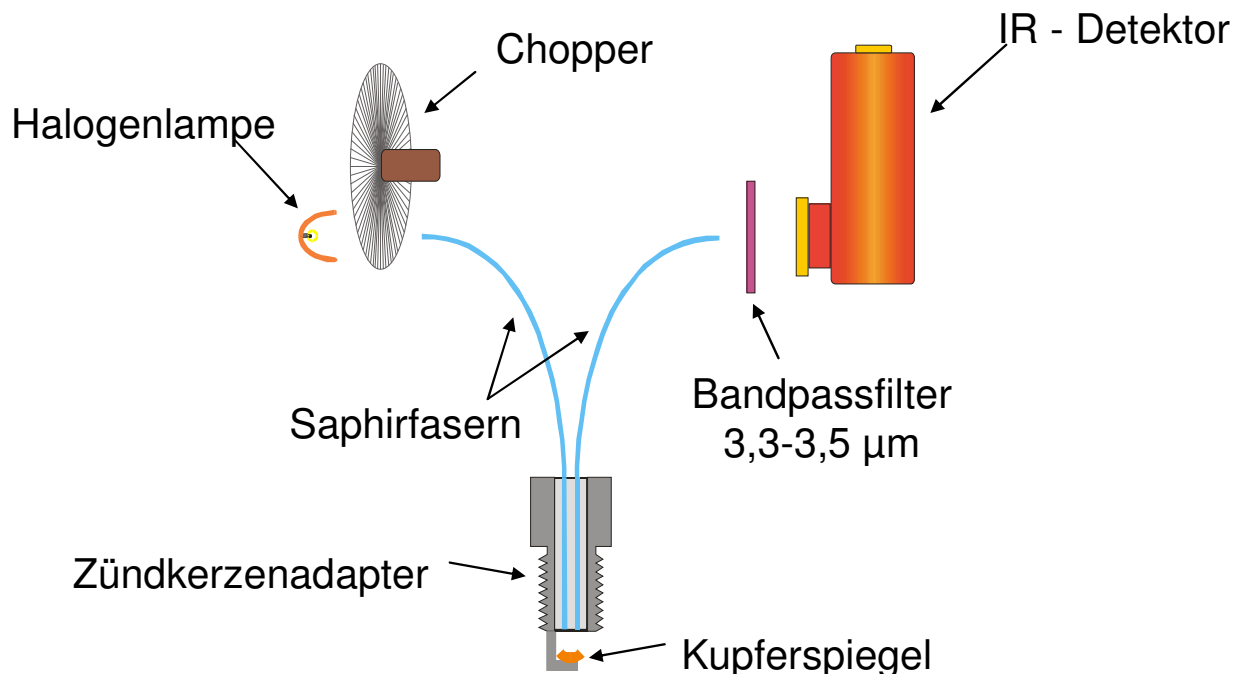
Tabelle 5.1: ungefeuerte Betriebspunkte, IR-Absorptionssensormessungen

Um die Betriebsparameter für die geschleppten Messungen festzulegen, wird der Motor zunächst ohne Sensor gefeuert betrieben. Mittels der am Prüfstand vorhandenen Messtechnik werden die wesentlichen Betriebsparameter wie Saugrohrdruck, Einspritzmenge und Dauer,

Zündzeitpunkt und Stellung der Ladungsbewegungsklappe sowie der eingestellte Lambdawert aufgezeichnet, um bei geschlepptem Motor in der Lage zu sein, den zuvor definierten Betriebspunkt wieder einstellen zu können. Dies ist notwendig, da die Lambdamessung im Abgas nur bei gefeuertem Motor möglich.

5.1.2 Systemkomponenten und experimenteller Aufbau

Die zur Messung der Absorption im ungefeuerten Motorbetrieb wesentlichen Komponenten sind in Abbildung 5.1 dargestellt. Das Licht einer Halogenlampe wird mittels eines elliptischen, goldbeschichteten Reflektors durch ein Chopperrad auf das Ende einer 1,5 m langen Saphirfaser mit einem Durchmesser von $425\ \mu\text{m}$ fokussiert und in einen Zündkerzenadapter weitergeleitet. Saphirfasern haben gegenüber den ebenfalls aus der Literatur bekannten Chalkogenid-Fasern den Vorteil, dass sie durch ihre hohe Schmelztemperatur motornah eingesetzt werden können und nicht auf einen Temperaturbereichen $<300^\circ\text{C}$ beschränkt sind.



Quelle: O. Thiele (LLG)

Abbildung 5.1: Prinzipskizze des Absorptionssensors ohne Zündfunktion [40]

Der Zündkerzenadapter ersetzt die Zündkerze und weist an Stelle einer Mittelelektrode einen ebenfalls Gold beschichteten, konkaven Kupferspiegel auf, der das Licht aus der Beleuchtungs-faser auf das Ende einer zweiten Beobachtungsfaser fokussiert.

Der freie Abstand zwischen den durch ein 1 mm dickes Saphirfenster vor Schäden und Verunreinigung geschützten Faserenden und der Spiegelebene beträgt 7,5 mm, so dass sich eine Absorptionsstrecke von 15 mm Länge ergibt. Das Licht aus der Beobachtungsfaser wird durch einen Bandpassfilter mit einer Zentralwellenlänge von $3,4\ \mu\text{m}$ und einer Halbwertsbreite von ca. 300 nm auf einen Peltier-gekühlten HgCdTe-Detektor (Vigo – PDI-2TE-4) geleitet, dessen Aus-

gangsspannung durch einen Wechsellspannungsverstärker⁸ auf einen Analogausgang gegeben wird. In Kapitel 3.2.3 wurde in Abbildung 3.2 bereits der qualitative Verlauf des Absorptionsspektrums des Kraftstoffs und der Transmissionskurve des Filters [40] gezeigt. Dieser ist so gewählt, dass nur der Wellenlängenbereich der CH-Absorptionsbande auf die Detektoroberfläche gelangt. Da H₂O in diesem Bereich ebenfalls Absorptionsbanden aufweist, kann das Absorptionssignal insbesondere nach der Verbrennung durch dessen Anwesenheit beeinflusst werden. Da der Absorptionsquerschnitt des Kraftstoffs im hier relevanten Wellenlängenbereich um Faktor 100 größer ist, kann der Einfluss des Wassers vernachlässigt werden [40]. Wie bereits in Kapitel 3.2.3 erläutert, haben die spektrale Überlappung des Transmissionsspektrums des Filters und des Absorptionsspektrums des Kraftstoffs Einfluss auf die Linearität der Abhängigkeit der Absorption von der Kraftstoffkonzentration. Dieser Einfluss wird im Rahmen der Beschreibung des Kalibrationsverfahrens in Kapitel 5.1.5 genauer betrachtet.

Das Chopperrad dient zur Separation des Absorptionssignals vom Signaluntergrund. Wenn es die Lichteinkoppelung frei gibt und sich Kraftstoff in der Absorptionsstrecke befindet, wird ein Teil des Lichtes absorbiert, was zu einem Absinken der Lichtintensität am Detektor führt. Versperert das Chopperrad den Fasereintritt, dann entspricht das detektierte Signal der infraroten Hintergrundstrahlung, die besonders beim Einsatz im Brennraum während der Kompressionsphase in der Nähe des oberen Totpunkts dominant in Erscheinung tritt. Sie setzt sich zusammen aus der Planckschen Strahlung des Spiegelkörpers und aus der IR-Emission des heißen Kraftstoffs, welche bei den im geschleppten Motorbetrieb vorherrschenden Temperaturen überwiegt. In der anschließenden Auswertung der Rohsignale wird daher eine Differenz der beiden Signale bestimmt, um den Einfluss von Verschmutzung und Hintergrundstrahlung auf das Messergebnis zu eliminieren.

Die maximale Frequenz des Choppers ist durch die mechanische Festigkeit und Präzision der verwendeten Bauteile bestimmt. Die minimale Frequenz, die für eine anschließende Auswertung der Signale benötigt wird, hängt sowohl von der angestrebten Zeitauflösung als auch vom maximalen Gradienten der gemessenen Strahlungsintensität ab. Im geschleppten Motorbetrieb ist eine Frequenz von 6 kHz für eine kurbelwinkelaufgelöste Messung ausreichend. Bei gefeuerten Messungen hingegen sind die zeitlichen Variationen des Signalhintergrunds durch die höheren Temperaturen deutlich stärker, so dass die Chopperfrequenz erhöht werden muss, um weiterhin eine deutliche Modulation des Rohsignals zu erhalten.

Die Datenaufzeichnung und Auswertung erfolgt mit einem Standard-PC, der mit einem Sample and Hold-Board und einer A/D-Wandlerkarte zum Digitalisieren der Sensorsignale ausgestattet ist. Die Softwareroutinen zur Steuerung der Datenaufzeichnung und der anschließenden Auswertung sind in Davis-CL, einer Interpreterprogrammiersprache des Programmpakets Davis der Firma LaVision, geschrieben.

⁸ Niederfrequente (<1 Hz) bzw. konstante Signalanteile werden nicht verstärkt.

5.1.3 Datenauswertung

Eine Messung besteht zunächst aus 75000 Samples mit einer Aufzeichnungsrate von 250 kHz. Je nach Motordrehzahl lassen sich somit zweieinhalb bei 1000 min^{-1} bzw. fünf bei 2000 min^{-1} aufeinander folgende Motorzyklen aufzeichnen. Abbildung 5.2 zeigt einen typischen Verlauf des Absorptionssignals zweier Betriebspunkte im Homogenbetrieb mit früher Einspritzung und ohne Einspritzung sowie den zeitgleich aufgezeichneten Druckverlauf bei 1000 min^{-1} . Zur einfacheren Orientierung beschränkt sich der unten gezeigte Ausschnitt auf einen vollständigen Motorzyklus, wobei die vier Takte gesondert gekennzeichnet sind. Die Kurven sind zur besseren Unterscheidung separiert, da hier nur der qualitative Verlauf betrachtet werden soll.

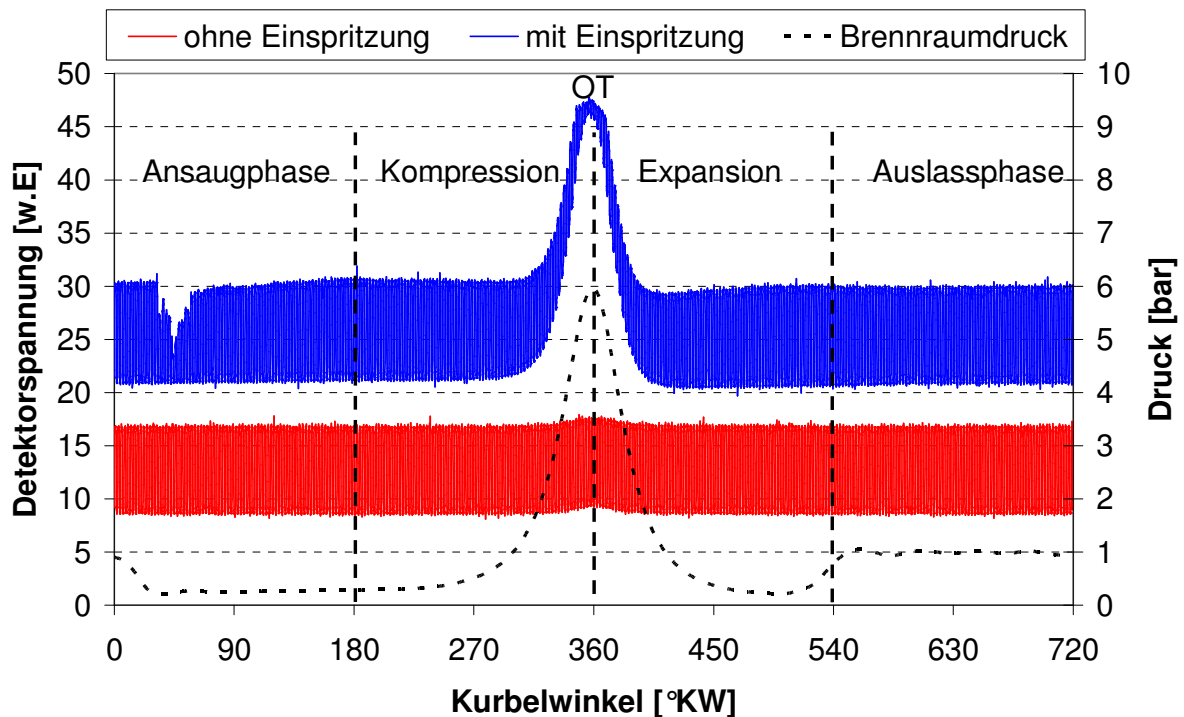


Abbildung 5.2: Typischer Signalverlauf der Detektorspannung zweier ungefeuerter Betriebspunkte im Homogenbetrieb, Gegenüberstellung mit und ohne Einspritzung

In dieser Darstellung erscheint das IR-Detektionssignal durch die geringe Zeitauflösung als breites Band. Der Verlauf des Detektorspannungsbandes des Betriebspunktes ohne Einspritzung (rote Kurve) ist nahezu konstant. Lediglich im Bereich um den oberen Totpunkt bei 360°KW ist der leichte Anstieg des Signalbandes zu erkennen, der durch den Temperaturanstieg im Brennraum hervorgerufen wird. Der Betriebspunkt mit Einspritzung weist gleich zu Beginn der Ansaugphase einen Signaleinbruch auf, da ein Teil des Kraftstoffs kurz nach dem Zeitpunkt der Einspritzung (30°KW) die Messstrecke passiert und so zu einer erhöhten Absorption führt. Anschließend wird die Kraftstoffwolke durch den herab fahrenden Kolben und die Luftströmung im Brennraum aus dem Messbereich transportiert, so dass das Rohsignal auf sein ursprüngliches Niveau zurückkehrt. In der späten Phase der Kompression vor dem oberen Totpunkt ist eine

starke Zunahme des Signals zu erkennen. Dieser Zeitausschnitt ist zur genaueren Analyse in Abbildung 5.3 vergrößert dargestellt.

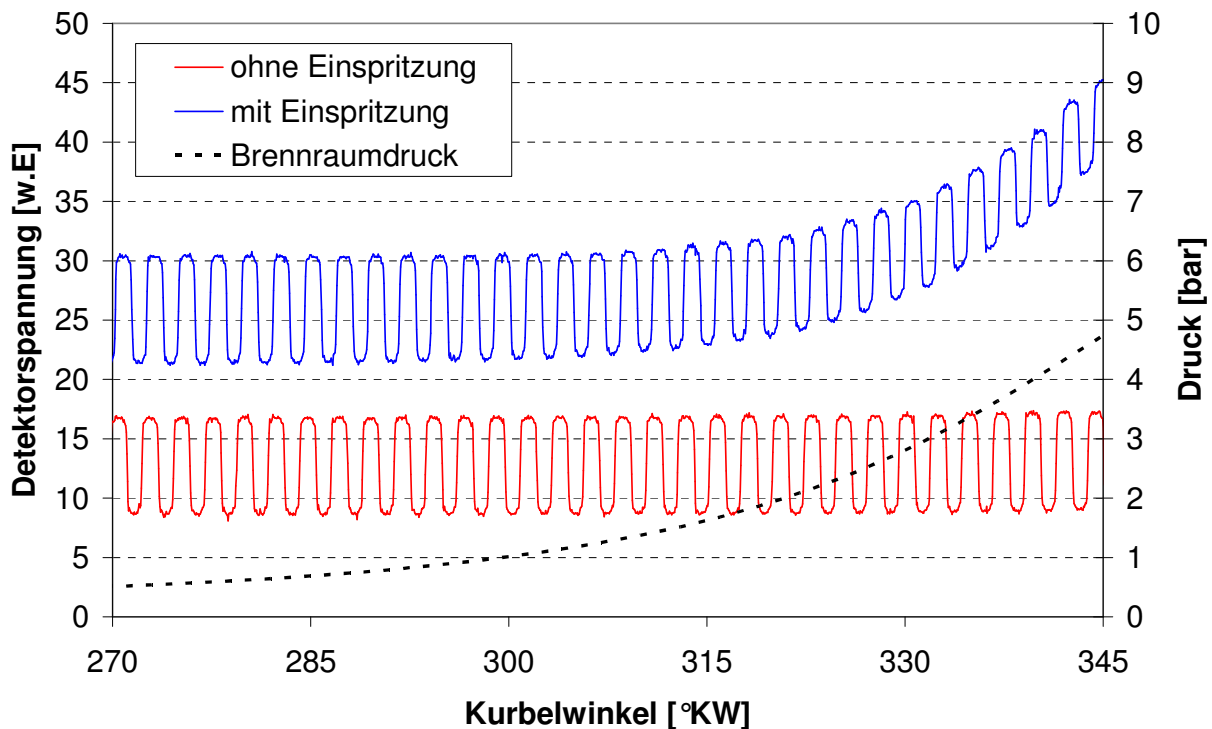


Abbildung 5.3: modulierte Detektorsignal (vergrößerter Ausschnitt von Abbildung 5.2)

Die aus der Chopperfrequenz – hier 5 kHz – resultierende Modulation des Detektorsignals ist nun deutlich zu erkennen, so dass der Verlauf des oberen und des unteren Niveaus der Rechteckkurve gesondert betrachtet werden können. Das so genannte Hintergrundsignal bezeichnet die Einhüllende des unteren Niveaus der Kurven und entspricht der Detektorspannung, wenn der Chopper die Lichtquelle verdeckt. Die Signalintensität setzt sich dann aus der Eigenemission des heißen Kraftstoffs und der Strahlung von heißen Oberflächen aus dem Brennraum zusammen. Der Verlauf der Minima über der Zeit der blauen Kurve korreliert mit dem Brennraumdruck, da die Brennraumtemperatur analog zum Druck um den oberen Totpunkt stark zunimmt und so zu einer erhöhten Strahlungsemission des heißen Kraftstoffs führt. Im Fall der roten Kurve – ohne Einspritzung – ist dieser Anstieg erwartungsgemäß nicht zu erkennen. Das obere Niveau der Kurven summiert sich aus der Beleuchtungsintensität und der Hintergrundstrahlung. Während die Amplitude der Modulation ohne Einspritzung (rote Kurve) keine Veränderungen über der Zeit aufweist, nimmt die Signalamplitude des Kurvenverlaufs mit Einspritzung (blaue Kurve) im hier dargestellten Bereich mit steigendem Brennraumdruck ab, da sich die Kraftstoffdichte während der Kompression erhöht und die Absorption zunimmt.

Um die Signalqualität bei der Auswertung zu verbessern, werden mehrere Datenpunkte mit einem „Software-Boxcar“⁹ zusammengefasst und gemittelt. Die Differenz der Mittelwerte aus dem oberen und unteren Niveau eines Modulationszyklus ist das um den Hintergrund bereinigte Rohsignal (1500 Samples), das, normiert auf einen Anfangszustand, die Transmission ergibt.

Die Abbildung 5.4 zeigt den Zeitverlauf des Roh-, Absorptions- und des Hintergrundsignals über dem Kurbelwinkel. Das in rot dargestellte Rohsignal, welches aus der Differenz des oberen und unteren Niveaus der Detektorspannung berechnet wird (Amplitude der Modulation), weist zu Beginn des Zyklus den bereits in der Detektorspannung von Abbildung 5.2 beobachteten kurzen Einbruch zu Beginn der Einspritzung auf (siehe Kreis).

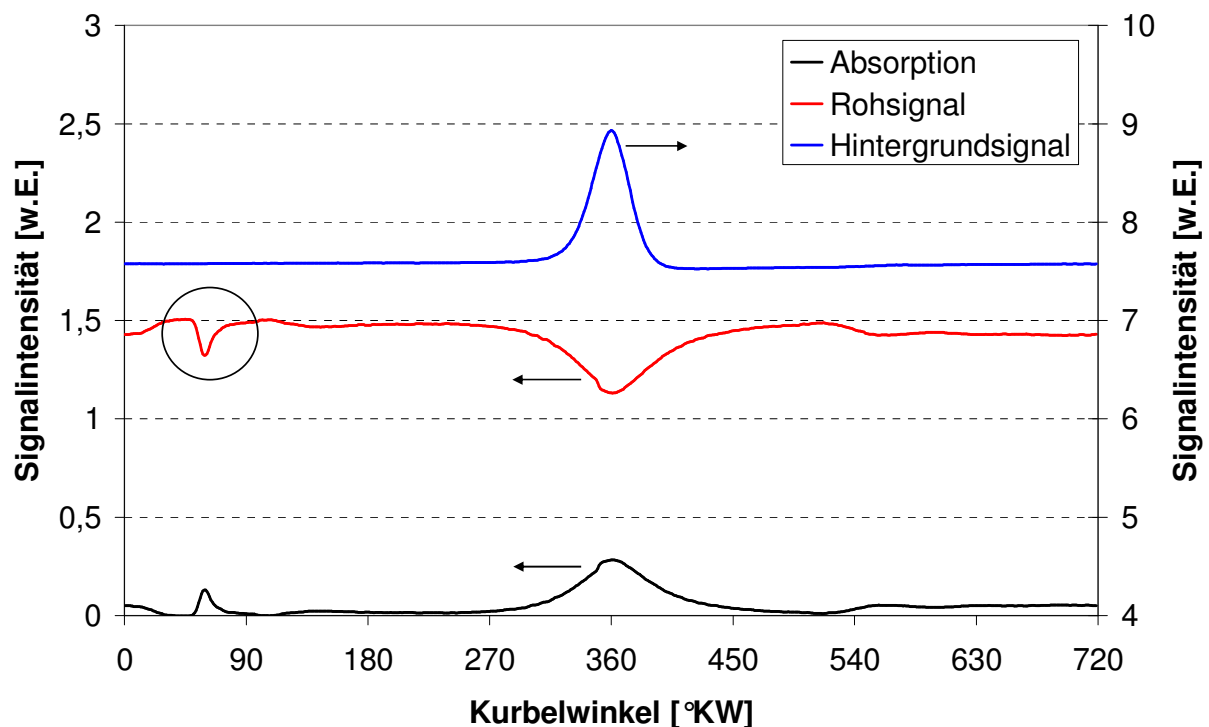


Abbildung 5.4: Zeitverlauf des Roh-, Absorptions- und Hintergrundsignals

Sehr deutlich ist nun auch die Signalabnahme durch die erhöhte Absorption während der Kompressionsphase rund um den oberen Totpunkt zu erkennen, der bei der Betrachtung des Rechtecksignals noch durch den hier in blau dargestellten Peak des Hintergrundsignalverlaufs überlagert wurde. Da bei den hier dargestellten Untersuchungen mit geschlepptem Motor keine Verbrennung erfolgt, steigt die Signalintensität wieder analog zum abnehmenden Brennraum-

⁹ Ein Programm, das analog zu einem „Hardware Boxcar-Averager“ (siehe [65]) eine Mittelung über ein vorgegebenes Zeitintervall durchführt. Das Zeitintervall wird hier über die Signalfanken zwischen dem oberen und unteren Zustand des Choppersignals definiert.

druck in der Expansionsphase an. Mit dem Öffnen der Ventile und dem daraus resultierenden Druckanstieg (ca. 540 °KW) ist eine geringfügige Abnahme der Rohsignalintensität zu beobachten.

Der Absorptionsverlauf in Abbildung 5.4 wird aus dem Rohsignal gemäß Gleichung 3.20 berechnet und ist direkt proportional zur Kraftstoffkonzentration. Für die Entwicklung und Verbesserung von Brennverfahren ist allerdings weniger die absolute Kraftstoffkonzentration von Interesse als vielmehr der zeitliche Verlauf des für die Verbrennung entscheidenden Luft-Kraftstoff-Verhältnisses. Aufgrund der starken Abhängigkeit des Absorptionssignals von Brennraumdruck und -temperatur muss der Signalverlauf um diese Einflüsse bereinigt werden.

5.1.4 Näherungsverfahren zur Lambdabestimmung, Druck- und Temperaturkorrektur

Das bislang vorgestellte Absorptionsmessverfahren ist lediglich in der Lage, die Kraftstoffkonzentration zu bestimmen. In der motorischen Gemischbildungsanalyse ist jedoch das Luft-Kraftstoff-Verhältnis, Lambda, von großer Bedeutung. So hängen die Zündfähigkeit des Gemisches und die Schadstoffbildung maßgeblich von Lambda ab [66]. Um die gemessenen Kraftstoffkonzentrationen in Lambdawerte umrechnen zu können, bedarf es der gleichzeitigen Bestimmung der Sauerstoffkonzentrationen. Da Sauerstoff als homonukleares Molekül Infrarot-inaktiv ist, lässt sich die Konzentration nicht mit dem hier vorgestellten Messverfahren ermitteln. Thiele hat ein physikalisches Näherungsverfahren entwickelt, um aus der Absorptionsgleichung 3.19 und der idealen Gasgleichung einen kurbelwinkelaufgelösten Verlauf des Lambda-Wertes gewinnen zu können, dessen Herleitung im folgenden Abschnitt kurz erläutert wird [40].

Für ein Luft/Kraftstoffgemisch ist die Kraftstoffkonzentration C in einem durchstrahlten Volumen V gegeben durch die Anzahl der Moleküle ν_k des Kraftstoffs in mol:

$$C = \frac{\nu_k}{V} \quad (5.1)$$

Aus dem Gesetz zur Absorption von Lambert-Beer ergibt sich dann:

$$\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = -\sigma_\lambda \cdot \frac{\nu_k}{V} \cdot L \quad (5.2)$$

mit der Länge der Absorptionsstrecke L , der gemessenen Intensität I und der Referenzintensität I_0 . Betrachtet man das Luft-Kraftstoff-Gemisch als ideales Gas, so gilt folgendes Gesetz für den Zusammenhang zwischen dem Druck p und der Temperatur T :

$$p \cdot V = (\nu_k + \nu_l) \cdot R_m \cdot T \quad (5.3)$$

mit ν_l mol Luft, ν_k mol Kraftstoff und der molaren Gaskonstanten $R_m = 8,31 \text{ J/Kmol}$.

Drückt man das Verhältnis der Mengen von Luft und Kraftstoff als Funktion von Lambda aus, so gilt:

$$\frac{v_l}{v_k} = \lambda \cdot L_{st} \cdot \frac{M_k}{M_l} = 49 \cdot \lambda \quad (5.4)$$

mit dem stöchiometrischen Luftbedarf¹⁰ $L_{st} = 14,5 \text{ kg/kg}$ und den molaren Massen von Luft und Kraftstoff $M_l \approx 29 \text{ g/mol}$ und $M_k \approx 98 \text{ g/mol}$. Bei einem Luft-Kraftstoff-Gemisch innerhalb der Zündgrenzen ($0,4 < \lambda < 1,4$)¹¹ ist die Kraftstoffmenge v_k sehr klein im Vergleich zur angesaugten Luftmenge und kann somit in Gleichung 5.3 vernachlässigt werden. Substituiert man nun das Volumen in Gleichung 5.2 durch die vereinfachte Beziehung aus dem Gesetz für ideale Gase, so ergibt sich ein konzentrationsabhängiger Wert α_k , für den gilt:

$$\alpha_k = \frac{-\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)}{\frac{p}{T}} = \frac{\sigma_\lambda \cdot L}{R_m} \cdot \frac{v_k}{v} \quad (5.5)$$

α_k ist damit direkt proportional zu dem Quotienten aus Kraftstoff- und Luftmenge und ist daher vergleichbar mit einem inversen relativen Lambda-Wert. I_0 ist die Referenzintensität, wenn sich kein Kraftstoff im Messvolumen befindet. Sie entspricht dem Maximum der Detektorspannung während eines Messzyklus und liegt kurz vor Beginn der Einspritzung an, wenn die Einlassventile bereits geöffnet sind und Frischluft in den Brennraum geströmt ist.

Um eine absolute Bestimmung von Lambda durchzuführen, ist eine Kalibration mit bekannten Luft-Kraftstoff-Verhältnissen notwendig. Der Brennraumdruck kann über einen in der Motorenentwicklung üblichen Druckaufnehmer experimentell bestimmt werden. Die experimentelle Bestimmung der Gemischtemperatur ist schwieriger, da die meisten konventionellen Temperaturmessverfahren entweder durch die Dynamik der Temperaturänderungen überfordert werden oder der Einsatz aufgrund der räumlichen Randbedingungen ausgeschlossen ist.

Allerdings kann die Temperatur näherungsweise auch rechnerisch bestimmt werden. Hierzu wird eine Energiebilanz für das Brennraumvolumen zur Berechnung der Zustandsänderungen im Zylinder aufgestellt. Betrachtet man nur den Zeitraum währenddessen die Ein- und Auslassventile geschlossen sind, kann von einem geschlossenen System ausgegangen werden. Eine Änderung der inneren Energie kann dann nur durch Wärmeübergänge an den Brennraumwänden sowie durch Volumenänderungsarbeit erfolgen. Ohne Herleitung gilt dann folgende Differentialgleichung für die Änderung der Temperatur über dem Kurbelwinkel [67]

¹⁰ Der stöchiometrische Luftbedarf ist eine dimensionslose Kennzahl, die angibt, wie viel kg Luft zur vollständigen Verbrennung von einem kg Brennstoff notwendig sind.

¹¹ Diese Zündgrenzen gelten für ideal durchmischte Luft-Kraftstoff-Gemische [68]. Die experimentellen Zündgrenzen im Motorversuch können davon abweichen.

$$\frac{dT}{d\phi} = \frac{1}{m \cdot c_v} \cdot \left\{ H_u \cdot m_{k0} \cdot \frac{dX_v}{d\phi} + \frac{\alpha}{\omega} \cdot A \cdot (T_w - T) - p \cdot \frac{dV}{d\phi} - m \cdot \frac{\partial u_i}{\partial \lambda} \cdot \frac{d\lambda}{d\phi} \right\} \quad (5.6)$$

unter Verwendung folgender Größen:

ϕ : Kurbelwinkel

m : Gemischmasse

c_v : spez. Wärmekapazität

H_u : unterer Heizwert des Kraftstoffs

m_{k0} : gesamte Kraftstoffmasse vor Einsetzen der Verbrennung

X_v : das Verhältnis von verbranntem zu nicht verbranntem Kraftstoff

α : Wärmeübergangskoeffizient

ω : Kreisfrequenz des Motors

A : wärmeübertragende Brennraumfläche

T_w : mittlere Brennraumwandtemperatur

T : Gastemperatur im Zylinder

V : Brennraumvolumen

u_i : spezifische thermische innere Energie

Neben den geometrischen Größen und Stoffkonstanten sind ebenso die Gemischmasse, die Kraftstoffmasse und die Kreisfrequenz aus den am Motorprüfstand aufgezeichneten Kenngrößen bekannt. Zur Abschätzung des Wärmeübergangs an den Brennraumwänden wird ein Ansatz nach Woschni verwendet. Der resultierende Temperaturverlauf weist gegenüber einer polytrop gerechneten Zustandsänderung ohne Berücksichtigung der Wärmeverluste ein niedrigeres Maximum zu früheren Zeitpunkten auf, da die Verluste im Bereich des oberen Totpunkts die Temperaturzunahme durch das abnehmende Volumen überkompensieren. In den Kurbelwinkelbereichen, wo das System aufgrund eines oder mehrerer geöffneter Ventile nicht als geschlossen angesehen werden kann und somit keine Temperaturwerte nach obiger Rechnung vorliegen, wird ein exponentieller Näherungsverlauf angenommen. Diese gröbere Näherung gilt für den Bereich von 0°–240°KW und von 480°–720°KW. In diesen Bereichen ist eine quantitative Beurteilung des Lambdawertes nicht möglich, daher beschränkt sich die Analyse der Lambda-verläufe in diesen Bereichen des Motorzyklus auf relative Vergleiche von Lambdavarationen zueinander.

Das Näherungsverfahren zur Lambda-Bestimmung geht davon aus, dass sich nur Raumluft und Kraftstoff im Brennraum befinden. Interne oder externe Abgasrückführung werden hierbei nicht berücksichtigt und bedürfen somit bei gefeuertem Motorbetrieb einer gesonderten Betrachtung.

Eine weitere Vereinfachung ist die Annahme, dass der Kraftstoff gleichmäßig im Brennraum verteilt ist und somit der Lambda-Wert über die Lambdasondenmessung im Abgas bekannt ist. Der Lambdawert wird am Motorprüfstand sowohl über die Lambdasonde als auch aus der Ab-

gasanalyse gerechnet. Bei besonders mageren Betriebspunkten kann die Abweichung der beiden Werte bis zu 0,1 betragen, wobei in solchen Fällen der Lambdawert der Abgasmessung verwendet wird, da die Probe aus dem Krümmer entnommen wird und somit zylinderselektiv ist.

5.1.5 Kalibration

Um eine eindeutige Zuordnung zwischen α_k und Lambda herstellen zu können, bedarf es der Kalibration des Sensors anhand bekannter Lambda-Werte. Im ungefeuerten Betrieb mit dem nicht-zündfähigen MIR-Sensor liefert die Lambdasonde im Abgas keine Werte. Hier werden im Vorfeld zu den eigentlichen Messdurchgängen mit dem MIR-Sensor eine Reihe von Referenzpunkten im gefeuerten Vollmotorhomogenbetrieb (ohne Sensor) vermessen. Bei diesem so genannten Lambda-Scan werden die Luftzufuhr über die Drosselklappe und die Einspritzmenge über die Ansteuerdauer des Kraftstoffinjektors so eingestellt, dass das mittels Lambdasonde gemessene Luft-Kraftstoff-Verhältnis bis an die Zündgrenzen variiert wird. Es entsteht dann eine Tabelle mit Betriebspunkten, in der die Ansteuerdauer des Injektors und der Luftdruck im Saugrohr einzelnen Lambdawerten zugeordnet werden können.

Anschließend wird der MIR-Sensor montiert und dieselben Betriebspunkte im Schleppbetrieb noch einmal angefahren und vermessen. Aus dem gemessenen Rohsignal kann zunächst ein Absorptionsverlauf berechnet werden. Mit den gemessenen Druckdaten sowie den daraus errechneten Temperaturverläufen kann für jeden Betriebspunkt ein Verlauf des Parameters α_k über dem Kurbelwinkel errechnet werden. Unter der Annahme, dass der in der frühen Einlassphase eingespritzte Kraftstoff zum Zeitpunkt des Zünd-OT vollständig verdampft und homogen im Brennraum verteilt ist, kann vorausgesetzt werden, dass die Gemischzusammensetzung in der Messstrecke den am Prüfstand eingestellten globalen Lambdawerten entspricht. Bildet man nun für jeden Betriebspunkt des Lambda-Scans den Mittelwert von α_k zum Zündzeitpunkt über einen Zeitbereich von 10°KW, so erhält man für jeweils ein α_k -Lambda-Wertepaar deren Gesamtheit den funktionalen Zusammenhang zwischen α_k -Lambda, die Kalibrationskurve, darstellen.

Der Typ der Näherungskurve ergibt sich aus den Definitionen von Lambda und α_k . Durch das Ersetzen der theoretischen Luftmasse $m_{L,th}$ durch das Produkt aus Brennstoffmasse und dem stöchiometrischen Luftbedarf $m_B \cdot L_{st}$ in Gleichung 2.1 ergibt sich folgender Zusammenhang für das Luft-Kraftstoff-Verhältnis:

$$\lambda = \frac{m_L}{m_{L,th}} = \frac{m_L}{m_B \cdot L_{st}} \quad (5.7)$$

Vergleicht man den Zusammenhang zwischen Lambda und dem Quotienten aus Luft- und Kraftstoffmasse in Gleichung 5.7 mit der Definition von α_k und dessen Antiproportionalität zum Verhältnis von Luft- und Kraftstoffmasse in Gleichung 5.5, so lassen sich die aufgezeichneten Messwertepaare aus α_k und Lambda am besten beschreiben durch eine Kurve des Typs:

$$\lambda = m \cdot \alpha_k^n \quad (5.8)$$

mit den Kalibrationskonstanten m und n . Im Idealfall, wenn die Absorption nach Lambert-Beer direkt proportional zur Kraftstoffkonzentration ist, beträgt der Exponent $n = -1$. Aufgrund der nicht-idealen Überlappung von Detektions- und Absorptionsspektrum ist der Zusammenhang zwischen der Absorption und der Kraftstoffkonzentration nicht vollständig linear (siehe Kapitel 3.2.3 und Abbildung 3.2), daher gilt hier $n \approx -1$.

In Abbildung 5.5 sind die gemessenen Referenzpunkte sowie die verwendete Kalibrationskurve aufgetragen. Bei den nachfolgend dargestellten Messwerten wird der Verlauf von α_k anhand der Kalibrationskurve in einen Lambdaverlauf umgerechnet.

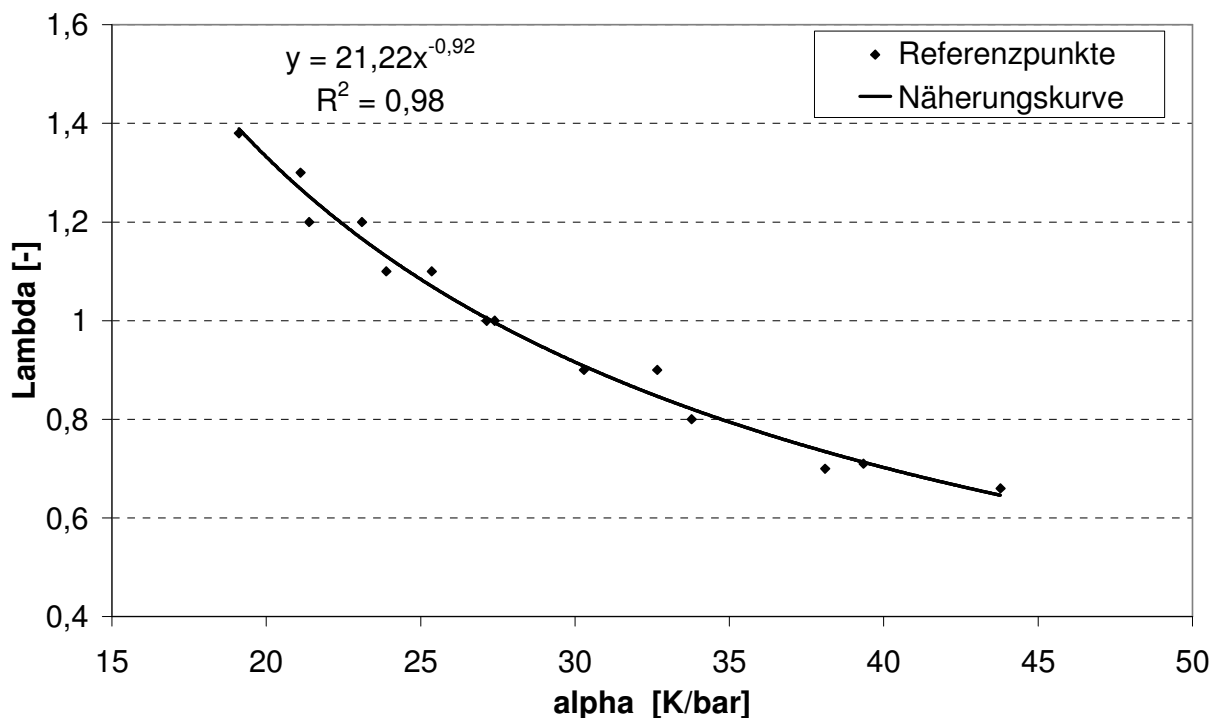


Abbildung 5.5: Kalibrationskurve, Lambda als Funktion von Alpha

5.1.6 Näherungsverfahren zur Lambdabestimmung, Berechnung des Brennraumvolumens

Eine alternative Möglichkeit zu der von Thiele vorgeschlagenen Methode, die gemessene Absorption durch Korrektur von Druck und Temperatur in eine Lambda-proportionale Größe zu überführen, besteht über die Korrektur der Änderung der Kraftstoffdichte während der Kompression durch die Berechnung des Brennraumvolumens zum jeweiligen Kurbelwinkel $V(\phi)$ und die anschließende Normierung auf ein Bezugsvolumen V_{Ref} gemäß Gleichung 5.9.

$$\text{korrigierte Absorption}(\phi) = \text{Absorption} \cdot \frac{V(\phi)}{V_{Ref}} \quad (5.9)$$

Die so berechnete Größe ist eine auf konstante Dichte korrigierte Absorption, die zunächst unabhängig von der Luftmenge im Brennraum ist. Um daraus eine Lambda-abhängige Größe zu

berechnen muss die Gleichung 5.9 um einen von der Luftmenge abhängigen Term erweitert werden. Schintzel hat gezeigt [15], dass der Liefergrad und somit die angesagte Luftmenge pro Arbeitsspiel für diesen Motortyp in erster Näherung proportional zum Saugrohrdruck ist. Durch die Erweiterung der Gleichung 5.9 um den Quotient aus einem Referenzsaugrohrdruck p_{ref} und dem Saugrohrdruck p_{sau} des jeweiligen Betriebspunkts erhält man gemäß Gleichung 5.10 die bezogene Absorption:

$$\text{bezogene Absorption}(\phi) = \text{korrigierte Absorption}(\phi) \cdot \frac{p_{ref}}{p_{sau}} \quad (5.10)$$

Der Bezugssaugrohrdruck entspricht in diesem Fall 650 mbar. Über Kalibriermessungen kann auch hier eine direkte Zuordnung zwischen Lambda und der bezogenen Absorption hergestellt und eine Näherungsfunktion abgeleitet werden.

Die folgende Abbildung 5.6 zeigt den Quotienten aus der Größe α_k deren Berechnung in Kapitel 5.1.4 erläutert wurde, und der bezogenen Absorption in einem Kurbelwinkelintervall bei geschlossenen Ventilen. Als Bezugsvolumen wurde das Volumen zum Zeitpunkt 275°KW gewählt. Zur einfacheren Beurteilung wurde der Quotient durch eine Proportionalitätskonstante erweitert.

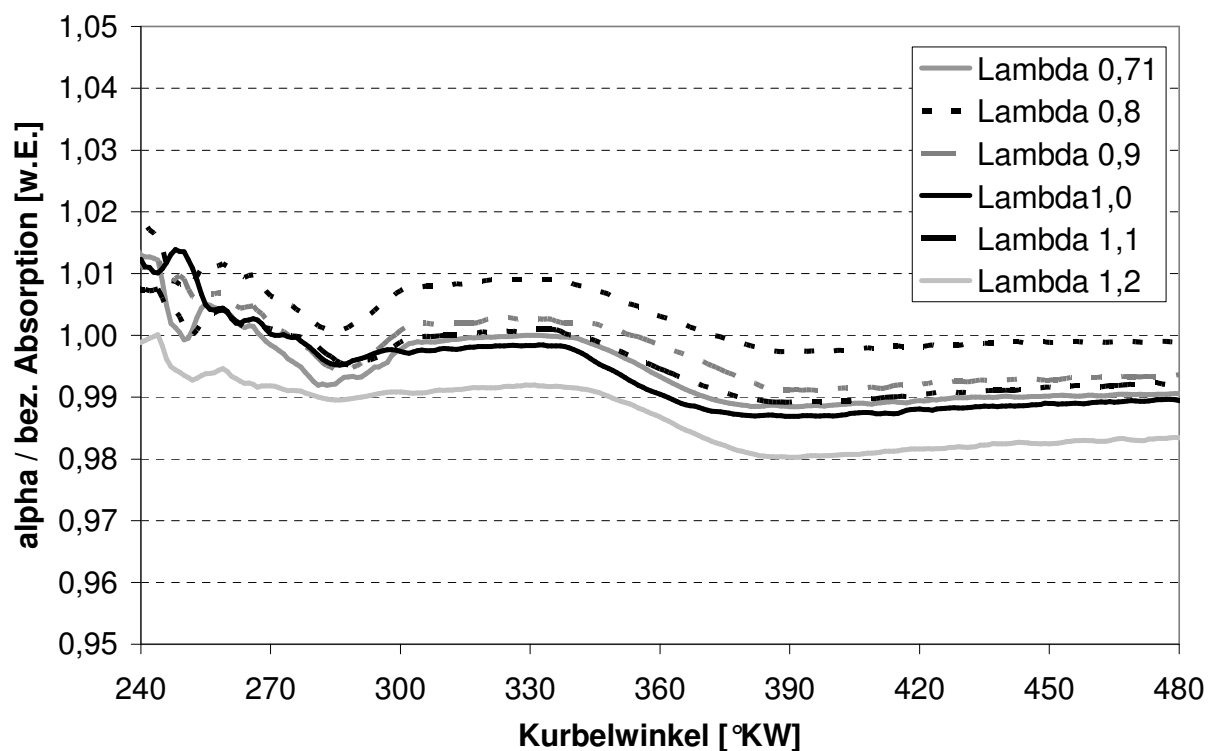


Abbildung 5.6: Quotient α_k / bezogene Absorption

Die Abweichungen der beiden Verfahren sind innerhalb eines Betriebspunktes über den gesamten Kurbelwinkelbereich kleiner als $\pm 2\%$. Ebenso betragen die maximalen Abweichungen der Betriebspunkte zueinander ca. 2%. Somit liefern beide Auswerteverfahren ähnliche Ergebnisse. Eine Kalibrierkurve, die die Zuordnung zwischen Lambda und der bezogenen Absorption her-

stellt, unterscheidet sich daher lediglich durch die Proportionalitätskonstante.

Im Falle der in diesem Kapitel betrachteten Messungen bei geschlepptem Motor werden die Absorptionsverläufe mittels Druck- und Temperaturverlauf kompensiert, da die Druckverläufe auf Messdaten beruhen und die Temperaturverläufe aufgrund der ausbleibenden Verbrennung vereinfacht zu rechnen sind. Die in Kapitel 5.2 dargestellten Untersuchungen im gefeuerten Motorbetrieb beruhen auf der Auswertung mittels der Umrechnung der Absorptionswerte über das Zylindervolumen. Wie bereits anhand von Abbildung 5.6 dargestellt, sind die Abweichungen der Verfahren insbesondere im Bereich der Kompressionsphase sehr gering, allerdings ist der Rechenaufwand im Fall der Korrektur über das Zylindervolumen deutlich geringer.

Weiterhin wird in Kapitel 5.2 der Einfluss der Restkraftstoffkonzentration zum Zeitpunkt der Bestimmung der Referenzintensität untersucht und ein Verfahren zur Berücksichtigung dieser Einflüsse vorgestellt. Dies ist bei gefeuertem Motor von besonderem Interesse, da die Restkraftstoffkonzentration eine Funktion von Lambda im vorhergehenden Motorzyklus ist und durch den Brennverlauf beeinflusst wird. Im Falle der hier zunächst betrachteten geschleppten Betriebspunkte sind diese Abhängigkeiten nicht gegeben, und eine Messung der HC-Emissionen mittels Prüfstandsmesstechnik ist nicht möglich. Zum Zeitpunkt der Bestimmung der für die Berechnung der Absorption notwendigen Referenzintensität vorhandener Restkraftstoff wird daher für die Betriebspunkte einer Messreihe als konstant angesehen. Eine Berücksichtigung des Einflusses erfolgt hier durch die Kalibrierkurve.

5.1.7 Motorische Ergebnisse des MIR-Sensor ohne Zündkerzenfunktion

Die Abbildung 5.7 zeigt exemplarisch den mit Hilfe des oben vorgestellten Näherungsverfahrens gewonnenen gemittelten Lambdaverlauf eines ungefeuerten, homogenen Betriebspunkts bei 1000 min^{-1} mit einem Lambda-Wert zum Zündzeitpunkt (340°KW) von 0,9. Zusätzlich zum Lambdaverlauf sind die Standardabweichung von Lambda sowie der Brennraumdruck aufgetragen. Zu Beginn des Motorzyklus bei 0°KW befindet sich noch Restgas des vorherigen Zyklus im Brennraum. Da der Motor nicht gezündet wird, besteht das Restgas aus unverbranntem Kraftstoff/Luftgemisch, was in diesem Fall zu einem Lambda von ca. 1,3 führt. Die Standardabweichung ist auf einem niedrigen Niveau, da der Restkraftstoff aus dem vorhergehenden Motorzyklus homogen im Brennraum verteilt ist. Anschließend beginnt die Ansaugphase und der Lambdawert wie auch die Standardabweichung steigen sprunghaft an. Der Zeitpunkt des Anstiegs korreliert mit dem Abfall des Brennraumdrucks, der sich während der gedrosselten Ansaugphase einstellt. Das im Brennraum befindliche Restgemisch wird durch die einströmende Luft verdünnt. Zum Zeitpunkt 25°KW beginnt die Einspritzung des Kraftstoffs, die sich durch die Dauer für den Transport der Kraftstoffwolke von der Einspritzdüsespitze zur Zündkerze mit einer geringen Verzögerung im Lambdaverlauf niederschlägt und zu einem sprunghaften Abfall von Lambda führt. Anschließend wird die Gemischwolke durch die im Brennraum vorherrschende Tumbleströmung und den nach unten bewegten Kolben weiter transportiert, so dass der Lambdawert an der Zündkerze wieder ansteigt, da das Gemisch magerer wird. Bei ca. 140°KW erreicht der Lambdawert ein weiteres lokales Minimum, da ein Teil der fetten Gemischwolke durch die Luftströmung in die Messstrecke transportiert wird. Die nachfolgende Abmagerung mit einem

Maximum bei ca. 230°KW ist bereits deutlich geringer ausgeprägt als zu Beginn des Motorzyklus, da der Anteil des verdampften Kraftstoffs mit steigender Verweildauer im Brennraum und der Grad der Homogenisierung zunimmt. Die fortschreitende Homogenisierung kann auch anhand der Standardabweichung nachvollzogen werden, die im Bereich des oberen Totpunkts ihr Zyklusminimum erreicht. Weiterhin nimmt der Absolutwert der Absorption aufgrund der steigenden Gemischdichte zum oberen Totpunkt hin zu, was zu einer Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnis führt.

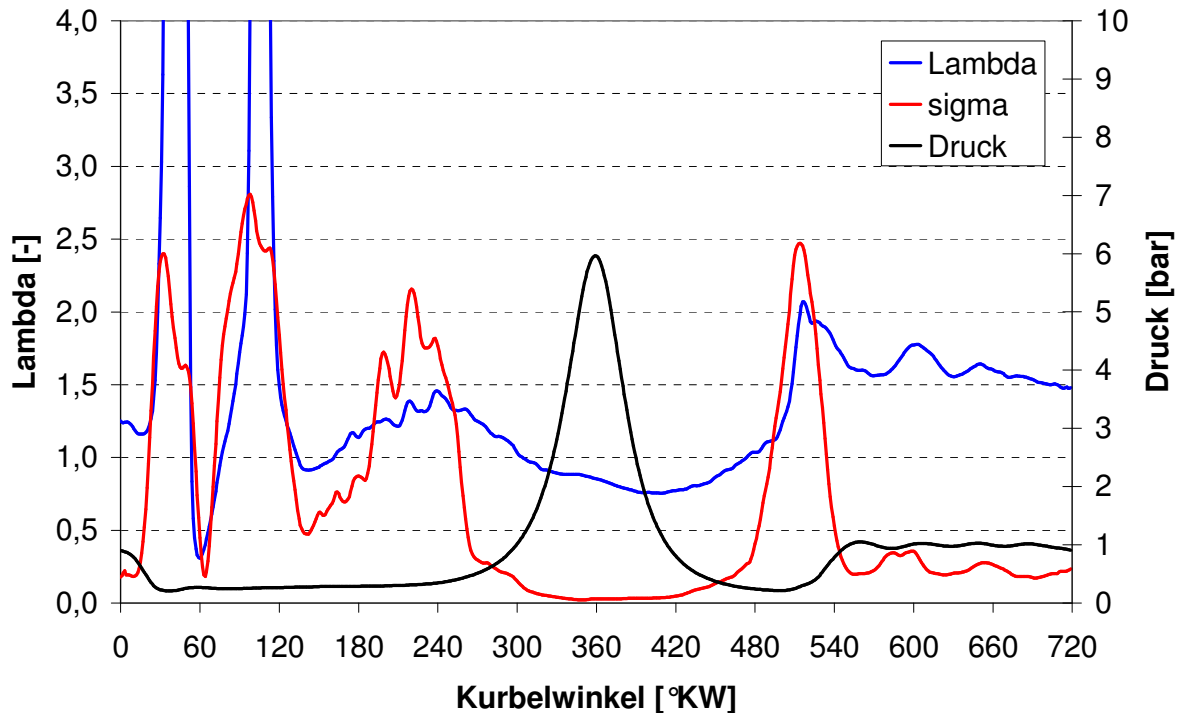


Abbildung 5.7: gemittelter Lambdaverlauf und Standardabweichung eines homogenen Betriebspunkts im Schleppbetrieb bei 1000 min^{-1} und niedriger Teillast, Mittelwert aus 30 Zyklen

Nach dem oberen Totpunkt fällt der Lambda-Wert zunächst weiter ab. Dieser Effekt kann auch im gefeuerten Betrieb auftreten und rührt von Kraftstoff her, der aus den Flammstegen, der Kolbenmulde und von den Brennraumwänden ausgast [34]. Der anschließende Anstieg des Lambdawertes ist zum einen auf eine unzureichende Näherung der Gemischtemperaturen im Bereich des Motorzyklus bei geöffneten Ventilen zurückzuführen (siehe Kapitel 5.1.4) und zum anderen ist die gemessene Absorption aufgrund der geringen Gemischdichte in dieser Phase des Motorzyklus sehr gering. Der Quotient aus Druck und Temperatur in Gleichung 5.5 ist dann der dominierende Faktor bei der Bestimmung von α_k , so dass bereits geringe Fehler bei der Abschätzung der Temperatur zu großen Ungenauigkeiten bei der Lambdabestimmung führen. Die Differenz des Lambdawertes zu Beginn (0°KW) und am Ende des Motorzyklus (719°KW) wird durch diese Ungenauigkeiten verursacht. Da auch nach dem Öffnen der Auslassventile in der Ausschubphase ein Restgasanteil im Brennraum verbleibt, ist bis zum Ende des Zyklus ein Kraftstoffsignal im Brennraum detektierbar. Bei der Beurteilung der Standardabweichung ist grund-

sätzlich zu berücksichtigen, dass diese zum einen die zyklischen Schwankungen der Gemischbildung widerspiegelt und zum anderen Messfehler durch das Rauschen des Detektors enthält. Diese Rauschanteile gehen umso stärker in den absoluten Wert der Standardabweichung ein, je größer der Lambda-Wert ist.

5.1.8 Lambdaverläufe im Homogenbetrieb

In Abbildung 5.8 sind die Lambdaverläufe für einen Lambda-Scan bei 1000 min^{-1} aufgetragen. Allen Kurvenverläufen gemein ist die fallende Flanke bei ca. 50°KW , da der Einspritzzeitpunkt für alle Betriebspunkte konstant ist. Die lokalen Minima bei 60°KW hingegen staffeln sich bereits gemäß ihrer unterschiedlichen Kraftstoff/Luftgemische, obwohl die Kraftstoffverteilung im Brennraum zu diesem Zeitpunkt noch äußerst inhomogen ist und aus LIF-Untersuchungen bekannt ist, dass ein Großteil des Kraftstoffs noch in der flüssigen Phase vorliegt. Die Absolutwerte der Minima sind deutlich geringer als der fetteste Messpunkt der als Stützstelle in die Kalibrierfunktion eingegangen ist. Da es sich um eine Extrapolation handelt, führt dies zu einer erhöhten Unsicherheit des Lambdawertes. Die relative Lage der Absolutwerte der dargestellten Betriebspunkte korrelieren jedoch mit dem Quotienten aus dem Saugrohrdruck und der Einspritzdauer, der als ein relatives Lambda aufgefasst werden kann und in Abbildung 5.9 dargestellt ist.

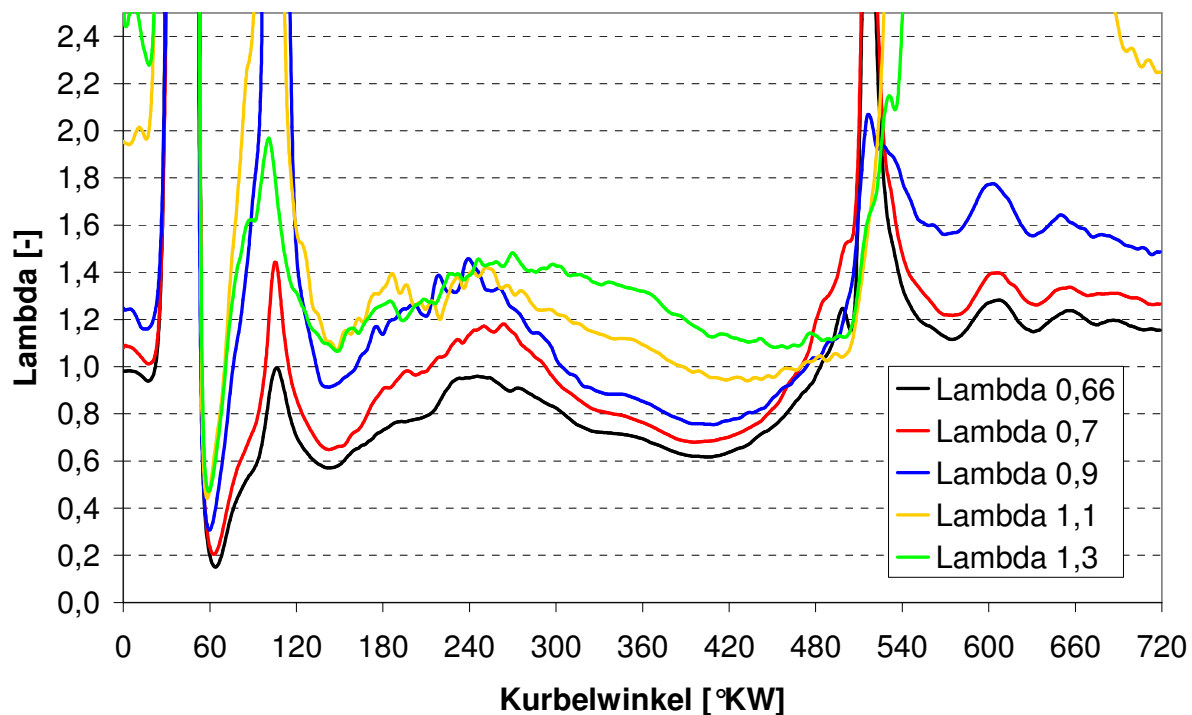


Abbildung 5.8: Lambdavarisation im Homogenbetrieb bei 1000 min^{-1} , geschleppter Motor, niedrige Teillast, Mittelwerte aus jeweils 30 Zyklen

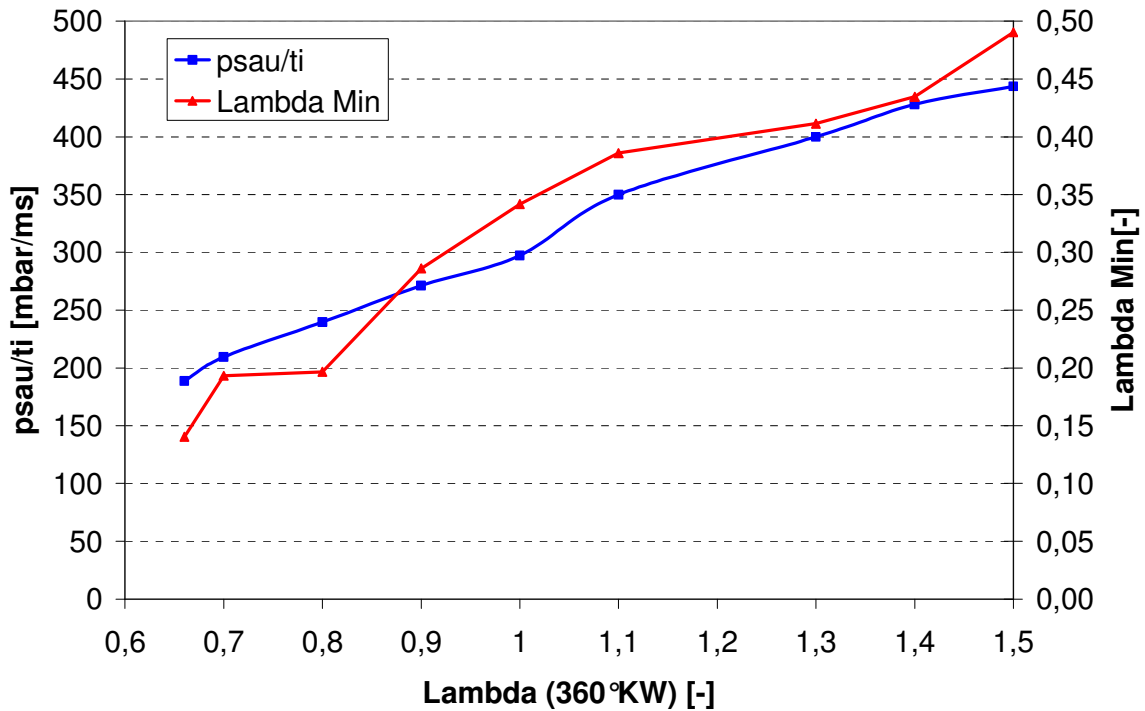


Abbildung 5.9: Korrelation zwischen dem gemessenen minimalen Lambda und dem Quotienten aus Saugrohrdruck und Einspritzdauer, geschleppter Homogenbetrieb, 1000 min⁻¹, Teillast

Ab ca. 300°KW ist die Gemischbildung weitestgehend abgeschlossen, und auch hier staffeln sich die Kurvenverläufe gemäß ihres Lambda-Wertes, was zu diesem Zeitpunkt aufgrund des bereits erläuterten Kalibrationsverfahrens zu erwarten ist. Während der Ausschubphase (ab 540°KW) liegen die berechneten Lambdawerte der besonders mageren Betriebspunkte außerhalb des hier dargestellten Bereichs. Die Ursache dafür liegt, wie bereits bei der Erläuterung Abbildung 5.7 erwähnt, in der geringen absoluten Absorption in diesem Kurbelwinkelbereich, wovon die mageren Betriebspunkte in besonderem Maße betroffen sind.

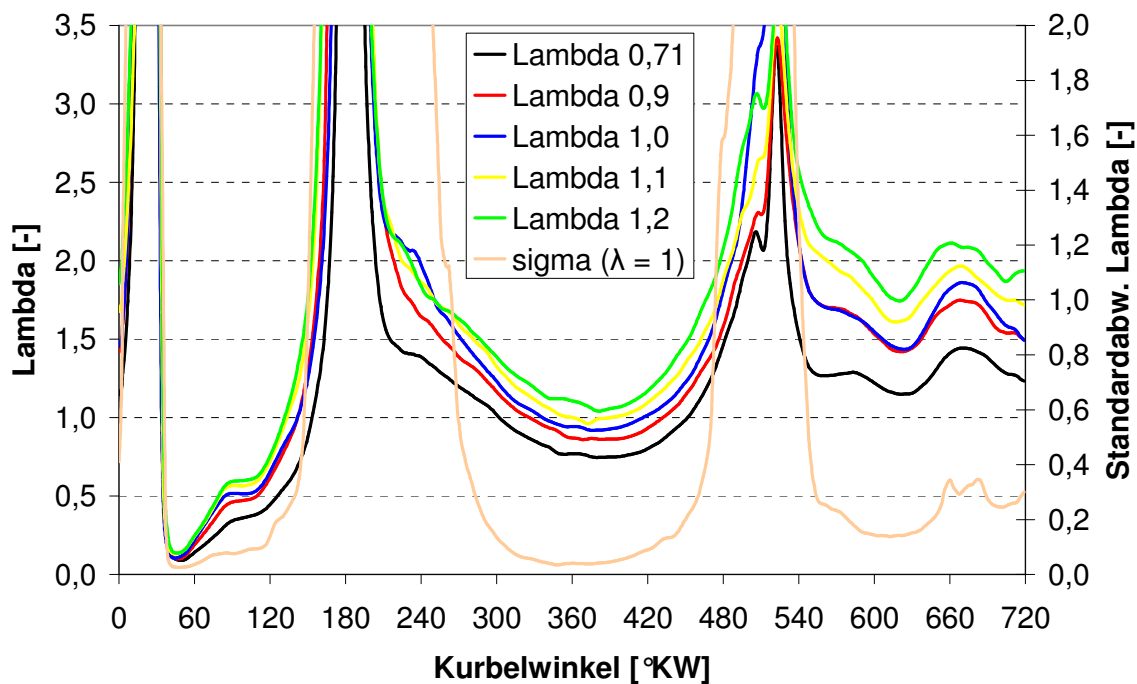


Abbildung 5.10: Lambdavariable im Homogenbetrieb bei 2000 min^{-1} , geschleppter Motor, niedrige Teillast, Mittelwerte aus jeweils 120 Zyklen

In Abbildung 5.10 sind die Lambdaverläufe über dem Kurbelwinkel für eine Lambda-Variation im Schleppebetrieb bei einer Motordrehzahl von 2000 min^{-1} aufgetragen. Der Verlauf weist charakteristisch ähnliche Maxima und Minima auf wie der Betriebspunkt bei einer Drehzahl von 1000 min^{-1} . Die Staffelung der Kurvenverläufe gemäß des Lambda-Wertes nach der Einspritzung (25°KW) erfolgt hier nicht im Bereich des absoluten Minimums, sondern erst im darauf folgenden Anstieg ca. 30°KW später. Eine mögliche Ursache für diesen Effekt könnte in der unzureichenden Genauigkeit des Messverfahrens außerhalb des kalibrierten Bereichs liegen. Die Kalibrierkurve (Abbildung 5.5) verläuft in diesem Bereich nahezu horizontal, so dass die gemessenen Unterschiede der Absorption sich nicht signifikant im Lambdaverlauf niederschlagen. Im Vergleich zu den Verläufen bei niedriger Drehzahl in Abbildung 5.8 erfolgt die Abmagerung nach Erreichen des lokalen Minimums bei 2000 min^{-1} erst zu einem späteren Zeitpunkt. Der Transport des eingespritzten Kraftstoffs im Brennraum wird in dieser frühen Phase der Gemischbildung durch die Einspritzparameter dominiert und wird hier durch die Verdoppelung der Motordrehzahl nur geringfügig beeinflusst, so dass die Zeitspanne zwischen dem lokalen Minimum des Lambdaverlaufs bei ca. 60°KW und dem Maximum bei ca. 180°KW bei Auftragung über dem Kurbelwinkel bei 2000 min^{-1} ca. doppelt so lang ist wie bei 1000 min^{-1} . In der Kompressionsphase ist der Lambdagradients für alle Betriebspunkte bei 2000 min^{-1} in Abbildung 5.10 stärker ausgeprägt als im Fall der Betriebspunkte bei 1000 min^{-1} in Abbildung 5.8. Die Verkürzung der für die Gemischbildung zur Verfügung stehenden Zeit durch die Drehzahlerhöhung führt dazu, dass das Lambda im Bereich der Messstrecke erst spät in der Kompression den Wert des globalen Lambdas annimmt.

Die Verläufe der Standardabweichung der einzelnen Betriebspunkte sind einander sehr ähnlich, daher ist lediglich der Verlauf für $\Lambda=1$ abgebildet. Im Bereich des oberen Totpunkts ist der Wert der Standardabweichung stets unterhalb von 0,05 und damit auf einem sehr niedrigen Niveau. Dies deckt sich mit den Erkenntnissen, die anhand von LIF-Messungen am Transparentmotor gewonnen worden sind [69].

5.1.9 Lambdaverläufe im Schichtbetrieb

Im Gegensatz zum Homogenbetrieb, bei dem die Einspritzung früh während der Ansaugphase erfolgt und dem eingespritzten Kraftstoff somit eine lange Zeit zur Gemischbildung mit der umgebenden Luft zur Verfügung steht, erfolgt die Einspritzung im Schichtbetrieb spät während der Kompressionsphase. Das Ansteuerende der Einspritzung ist neben dem Einspritzdruck, der Einspritzdauer und dem Zündzeitpunkt einer der Parameter mit dem größten Einfluss auf die Gemischbildung und die Güte der anschließenden Verbrennung im Schichtbetrieb.

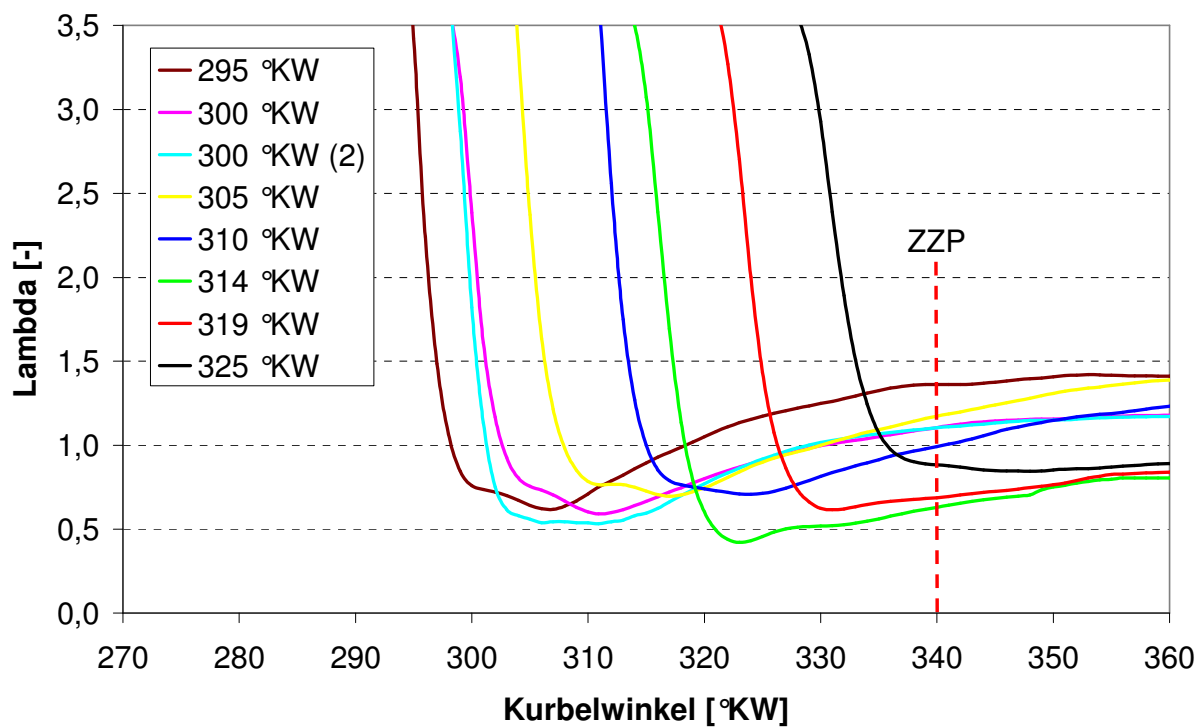


Abbildung 5.11: ASE-Scan, Schichtbetrieb 1000 min^{-1} , angedrosselt, geschleppter Motor, Mittelwerte aus 46 Zyklen, fiktiver Zündzeitpunkt bei 340°KW

Aus motorischen Untersuchungen ist bekannt, dass eine längere Gemischbildungszeit durch ein frühes Ansteuerende den Anteil des vorgemischten Kraftstoffs erhöht und den diffusionsgesteuerten Anteil der Verbrennung unter Luftmangel verringert [15]. In Abbildung 5.11 sind die Lambdaverläufe für eine Variation des Ansteuerendes (ASE-Scan) bei einer Drehzahl von 1000 min^{-1} aufgetragen. Bei sonst konstanten Betriebsparametern wird der Zeitpunkt der Einspritzung über einen Bereich von 295°KW bis 325°KW variiert, der Zündzeitpunkt läge im gefeuerten Betrieb bei 340°KW . Die Darstellung beschränkt sich aus Gründen der Übersichtlichkeit auf den Bereich

der Einspritzung in der Kompressionsphase vor dem oberen Totpunkt.

Zu Beginn des Motorzyklus besteht die Zylinderfüllung aus der angesaugten Frischluft und dem aus dem vorhergehenden Zyklus im Zylinder verbliebenen „Restgas“. Da das „Restgas“ im ungefeuerten Motorbetrieb aus Luft und Kraftstoff besteht, beginnen die Lambdaverläufe in Abbildung 5.11 nicht im Unendlichen, sondern lediglich auf einem erhöhten Niveau. Unmittelbar nach dem Ende der Einspritzung gelangt die Kraftstoffwolke an die Zündkerze, was zu einem steilen Abfall der Kurven führt. Die Lage und der Abstand der Flanken untereinander korrelieren mit dem Einspritzzeitpunkt.

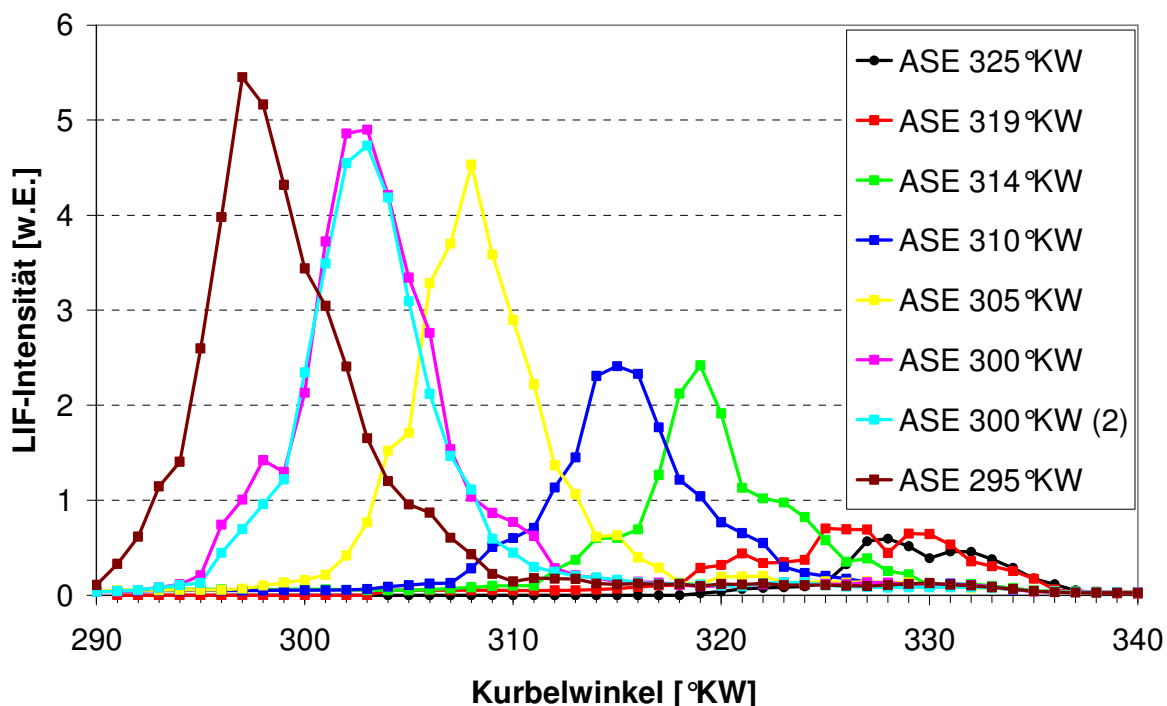


Abbildung 5.12: mittlere LIF-Intensität im Bereich unterhalb der Zündkerze für eine Ansteuerendevariation bei 1000 min^{-1}

Die Abbildung 5.12 zeigt die Auswertung von zeitgleich aufgezeichneten LIF-Bildern mittels Endoskop. Dort ist der zeitliche Verlauf der mittleren LIF-Intensität in einem Auswertefenster kurz unterhalb der Zündkerze aufgetragen (siehe rotes Rechteck in Abbildung 5.13). Bestimmt man nun für jeden Betriebspunkt der Ansteuerendevariation den Zeitpunkt der maximalen LIF-Intensität so fällt auf, dass diese ebenfalls mit dem Einspritzzeitpunkt korrelieren. Der linke Teil der Abbildung 5.13 zeigt die Differenz zwischen dem Zeitpunkt der maximalen LIF-Signalintensität und dem Unterschreiten der Schwelle von $\lambda=3$ für die verschiedenen Ein-

spritzzeitpunkte¹². Der Wert schwankt um ± 1 °KW, was der Größenordnung der Auflösung der Datenaufzeichnung entspricht. Somit stimmen die Ergebnisse des MIR-Sensors im Bereich des Einspritzzeitpunktes, mit Ausnahme des Betriebspunktes mit einem Ansteuerende von 325 °KW, mit den qualitativen Ergebnissen der Fluoreszenzuntersuchungen überein. Im Fall des späten ASE von 325 °KW kann dieser Zusammenhang nicht dargestellt werden, da eine Auswertung der LIF-Intensitäten zu Zeitpunkten später als 332 °KW durch den Kolben beeinflusst wird, der zu diesem Zeitpunkt bereits einen Teil des Auswertefensters abschattet.

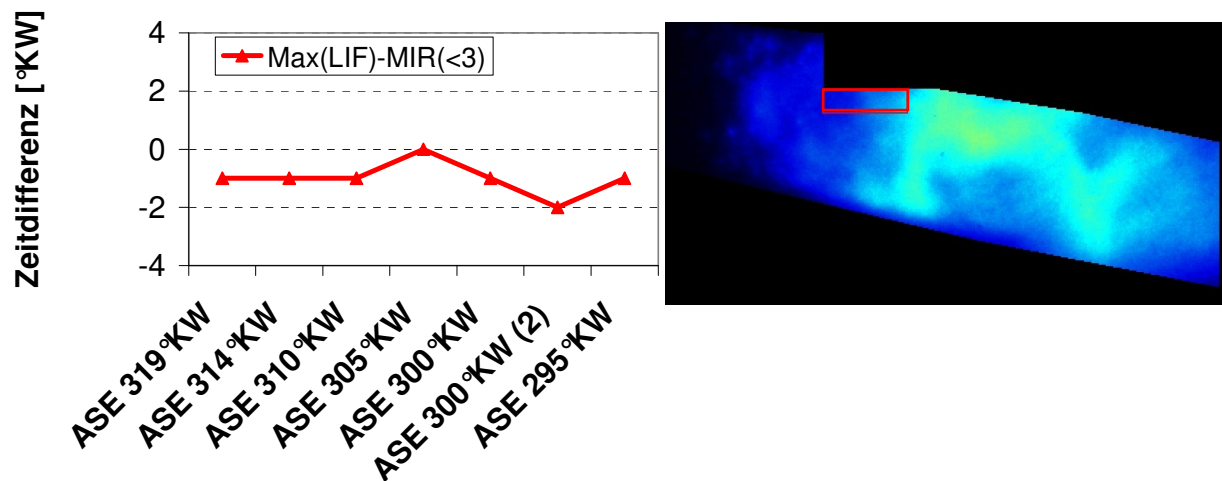


Abbildung 5.13: Korrelation zwischen der fallenden Flanke im Lambdaverlauf des MIR-Sensors mit der Lage der Maximalintensität der LIF-Messungen für eine Ansteuerendevariation

Die weitere Auswertung hinsichtlich eines quantitativen Vergleichs der Fluoreszenzintensitäten der verschiedenen Betriebspunkte untereinander ist hier nicht möglich, da sich die Druck- und Temperaturverhältnisse sowie insbesondere die Anteile des flüssigen und verdampften Kraftstoffs, deren Signal mit der vorgestellten Methode nicht getrennt detektiert werden kann, während der Kompressionsphase stark verändern. Die unterschiedlichen Fluoreszenzintensitäten sind somit nicht direkt proportional zur Kraftstoffkonzentration und können daher nicht quantitativ mit den bestimmten Lambdawerten des Absorptionssensors verglichen werden. In Kapitel 6 werden eine mögliche Erweiterung der beiden verwendeten Verfahren und die notwendigen Voraussetzungen diskutiert, um bei einem kombinierten Einsatz der beiden Messtechniken eine Quantifizierung der LIF Bilder zu erreichen.

Betrachten man nun den weiteren Verlauf der mittels MIR-Sensor bestimmten Lambdakurven nach erfolgter Einspritzung in Abbildung 5.11, so zeigt sich, dass das Gemisch an der Zündkerze nach dem Erreichen des Minimums langsam abmagert. Dies deckt sich mit den Erwartungen

¹² Die Höhe der Schwelle ist der Ausprägung der Lambdagradienten in Abbildung 5.11 angepasst. Werte zwischen 1 und 3,5 liefern qualitativ gleiche Ergebnisse.

aus der Theorie des Brennverfahrens (Kapitel 2.3), da das Gemisch mit fortschreitender Gemischbildungszeit durch die umgebende Luft weiter verdünnt wird. Aus dem Vergleich der Kraftstoff/Luftverhältnisse zum Zündzeitpunkt geht hervor, dass das Gemisch zu früheren Ansteuerenden magerer wird. Im Fall der frühesten Einspritzung von 295 °KW erreicht der mittlere Lambdawert mit 1,4 bereits die magere Zündgrenze. Der motorische Versuch bestätigt dies, da die Stabilität des Motorlaufs bei einem ASE von 295 °KW bereits schlechter ist als bei Betriebspunkten mit späterem ASE, die zum Zündzeitpunkt (340 °KW) ein deutlich fetteres Gemisch an der Zündkerze aufweisen. Im Fall der sehr späten Einspritzzeitpunkte ist gemäß der Lambdaverläufe in Abbildung 5.11 zwar ein stabiler Wert innerhalb der Zündgrenzen zu erwarten, allerdings ist die Gemischbildungszeit aufgrund des geringen Abstands zwischen Einspritzung und Zündung sehr kurz, was zu starker Rußbildung führt, daher kann ein sehr spätes Einspritztiming im Vollmotorbetrieb nicht umgesetzt werden. Der Betriebspunkt mit einem ASE von 300 °KW entspricht dem Kennfeldpunkt des Motors und wurde zweifach gemessen. Nach dem Erreichen eines minimalen Lambdawertes bei ca. 310 °KW magert das Gemisch bis zum Zündzeitpunkt auf einen Wert von ca. 1,1 ab, was zu einer stabilen, rußfreien Verbrennung führt. Die weitgehende Übereinstimmung der beiden zu unterschiedlichen Zeitpunkten gemessenen Kurvenläufe zeigt die gute Reproduzierbarkeit der Messung.

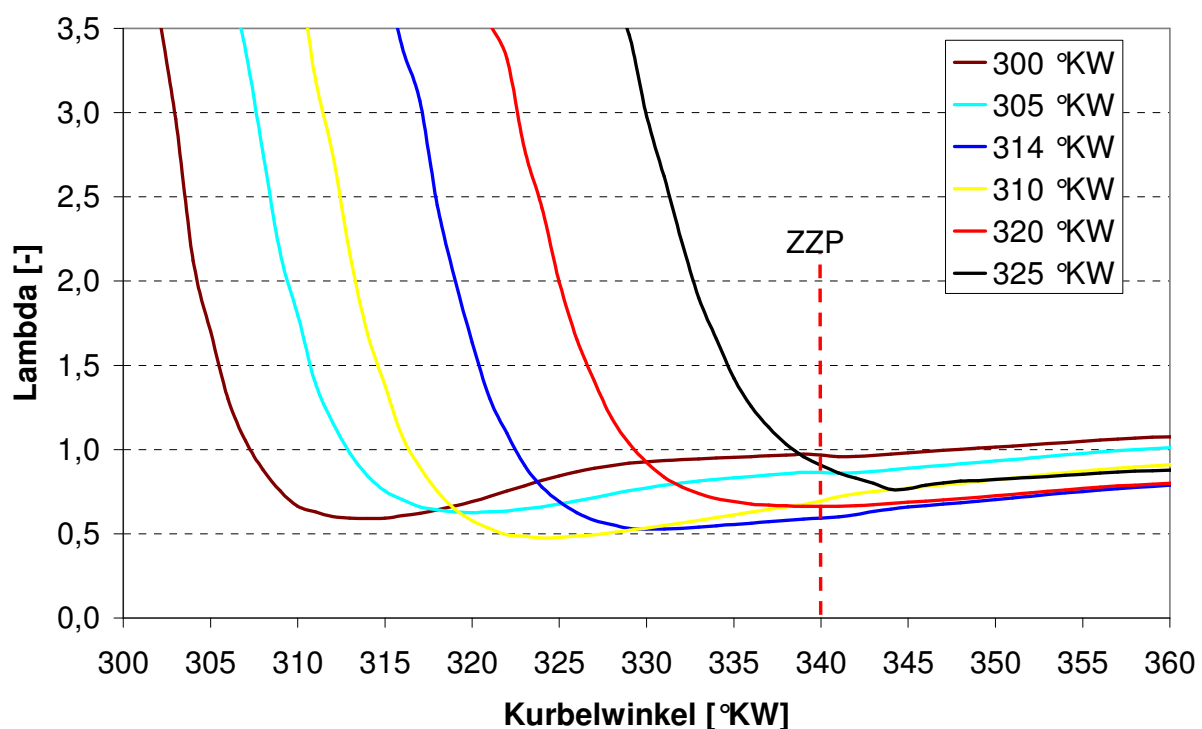


Abbildung 5.14: ASE-Scan, Schichtbetrieb 2000 min⁻¹, angedrosselt, geschleppt, Mittelwerte aus 160 Zyklen, fiktiver Zündzeitpunkt bei 340 °KW

In Abbildung 5.14 sind die Lambdaverläufe für einen Betriebspunkt bei 2000 min⁻¹ abgebildet. Der fiktive Zündzeitpunkt ist durch eine gestrichelte, rote Linie gekennzeichnet und liegt hier bei

340°KW. Wie schon bei 1000 min⁻¹ wird das Gemisch zum Zündzeitpunkt bei früheren Ansteuerenden magerer. Da der absolute Wert von Lambda auch im Fall des frühesten hier dargestellten ASE von 300°KW noch deutlich innerhalb der hier herrschenden Zündgrenzen¹³ ($0,7 \leq \lambda \leq 1,2$) liegt, könnte die Einspritzung zu einem noch früheren Zeitpunkt erfolgen, ohne dass die sichere Zündfähigkeit beeinträchtigt würde. Die Ursache für das weniger stark ausgeprägte Abmagern zum OT im Vergleich zu dem in Abbildung 5.11 dargestellten Betriebspunkt bei einer Drehzahl von 1000 min⁻¹ ist zum einen die um ca. 18% geringere angesaugte Luftmenge bei einer Motordrehzahl von 2000 min⁻¹ aufgrund des niedrigeren Saugrohrdrucks. Daraus folgt, dass das globale Lambda ebenfalls um ca. 18% fetter ist und die Verdünnung folglich auf ein niedrigeres Niveau hinaus läuft. Zum anderen ist der für die Abmagerung zur Verfügung stehende Zeitraum zwischen Einspritzung und Zündung bei doppelter Motordrehzahl nur noch halb so lang.

Die in Abbildung 5.14 ebenfalls dargestellten Betriebspunkte mit späten Ansteuerenden (>310°KW) weisen, wie auch die Betriebspunkte bei 1000 min⁻¹, zum Zündzeitpunkt sehr fette Gemischzusammensetzungen im Bereich der Zündkerze auf. Die nochmals verkürzte Gemischbildungszeit im Vergleich zum Motorbetrieb bei 1000 min⁻¹ führt hier zu starker Rußbildung im gefeuerten Betrieb.

Wie bereits in der Einleitung zu dieser Arbeit erläutert wurde, ist ein Ziel der geschichteten Direkteinspritzung eine möglichst vollständige Entdrosselung der Ansaugphase zu erreichen, um die Ladungswechselarbeit und somit auch den Verbrauch zu minimieren. Der motorische Versuch hat in den zuvor dargestellten Schichtbetriebspunkten allerdings ergeben, dass die gewünschte stärkere Entdrosselung hier leider nicht möglich ist, da der Motor trotz Ladungsschichtung nicht aussetzerfrei betrieben werden kann. Um dieses Phänomen anhand der Lambda-messung zu überprüfen, wurden zwei Messungen von Betriebspunkten mit einem ASE von 310°KW und 320°KW bei entdrosseltem Saugrohr durchgeführt. Die Abbildung 5.15 und die Abbildung 5.16 zeigen die Lambdaverläufe (durchgezogene Linien) und das jeweilige Streuband der Standardabweichung (gestrichelte Linien) für zwei unterschiedliche Saugrohrdrücke bei konstanten Einspritzparametern und einem ASE von 320°KW bzw. 310°KW. In beiden Betriebspunkten kommt es bei entdrosseltem Motor zu einer Häufung von Zündaussetzern, deren Ursache anhand der Lambdaverläufe ermittelt werden kann.

¹³ Die Zündgrenzen werden im gefeuerten Homogenbetrieb experimentell ermittelt. Das Gemisch wird so lange abgemagert bzw. angefettet, bis die ersten Zündaussetzer auftreten. Diese Grenzwerte werden dann für diesen durch Last und Drehzahl definierten Betriebspunkt als Zündgrenze festgelegt. Diese motorisch individuellen Zündgrenzen stimmen nicht immer mit den theoretischen Zündgrenzen idealer Gemische überein.

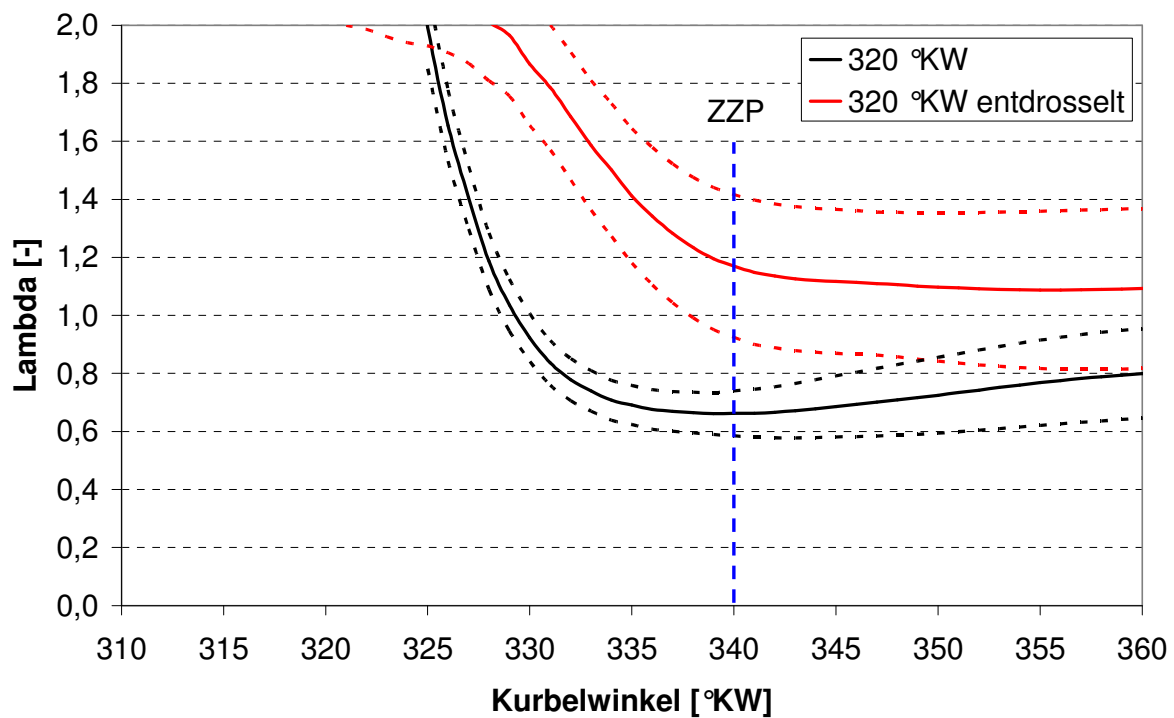


Abbildung 5.15: Drosselvergleich, Schichtbetrieb 2000 min^{-1} , ASE 320°KW , Mittelwert aus 160 Zyklen, Standardabweichung

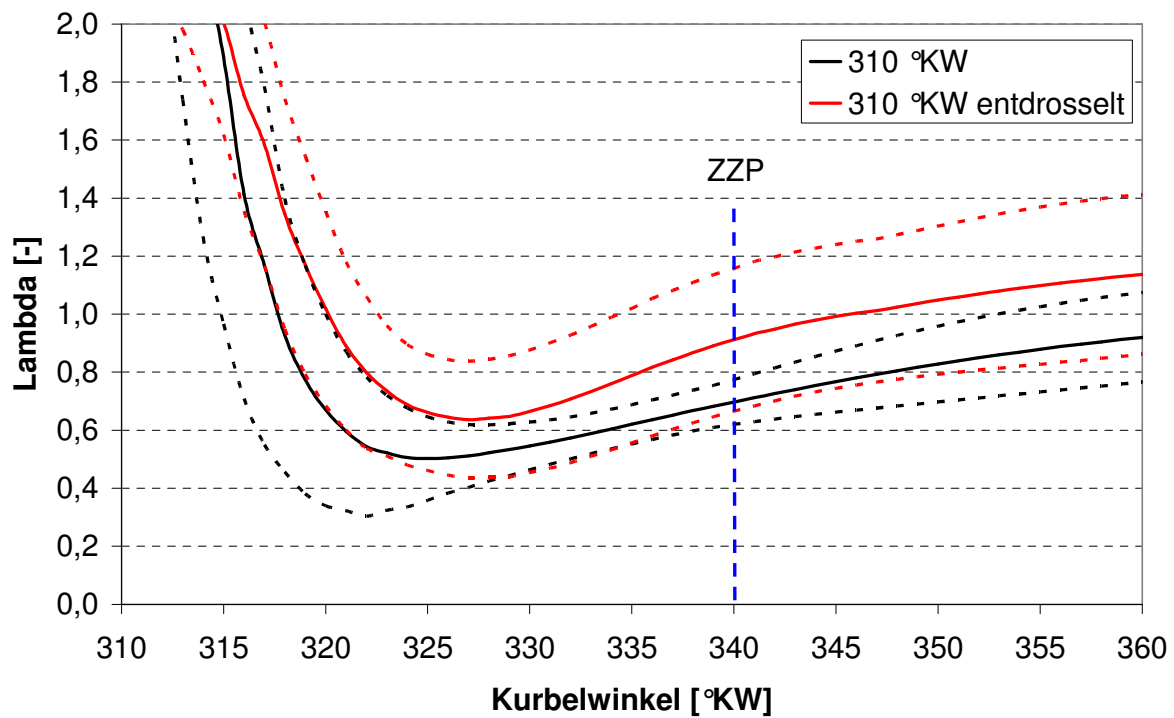


Abbildung 5.16: Drosselvergleich, Schichtbetrieb 2000 min^{-1} , ASE 310°KW , Mittelwert aus 160 Zyklen, Standardabweichung

Zum fiktiven Zündzeitpunkt, der durch die gestrichelte blaue Linie gekennzeichnet ist, ist das Gemisch bei entdrosseltem Motor für beide Einspritzzeitpunkte signifikant magerer als im ange-drosselten Zustand. Im Falle von ASE 320°KW wird weiterhin deutlich, dass die zyklischen Schwankungen der Gemischbildung ebenfalls stärker ausgeprägt sind und die Obergrenze der Schwankungsbreite bereits jenseits der Zündgrenzen¹³ von $0,7 \leq \lambda \leq 1,2$ liegt. Bei einem Ansteuerende von 310°KW ist das Gemisch zum Zündzeitpunkt deutlich fetter, allerdings befindet sich die Obergrenze der Schwankungsbreite auch hier in der Nähe der Zündgrenzen. Das Niveau der Standardabweichung zum Zündzeitpunkt ist bei gedrosseltem Motor auf dem gleichen Niveau wie bei späterem Einspritzende, allerdings ist die Streuung der Flanke im Bereich um 315°KW deutlich größer. Eine mögliche Ursache für dieses unterschiedliche Verhalten ist die Stellung des Kolbens, die im Falle des späteren ASE und der daraus höheren Kolbenposition die Ausbreitung des eingespritzten Kraftstoffs stärker stabilisiert als bei früherem ASE.

Die Betrachtung der Lambdaverläufe im Einzelzyklus liefert ebenfalls eine anschauliche Erklärung für die großen Unterschiede in der Stabilität des Motorlaufs bei angedrosseltem und unge-drosseltem Motor. In Abbildung 5.17 ist der Lambdaverlauf für eine Reihe von Einzelzyklen in einem Kurbelwinkelfenster von 290°KW - 340°KW in einem „Wasserfalldiagramm“ perspektivisch aufgetragen. Der Lambda-Wert ist farblich kodiert und reicht von 0,5 (blau) bis 2,0 (rot). Die Abstufung der Farben ist unter den Diagrammen aus einem segmentierten Farbbalken zu entnehmen. Die Lambda-Werte zum Zündzeitpunkt der Einzelzyklen sind durch eine schwarze Kurve hervorgehoben.

Die erste Abbildung zeigt die Verläufe für den gedrosselten Zustand bei ASE 320°KW. Wie aufgrund der niedrigen Standardabweichung in Abbildung 5.15 zu erwarten ist, gleichen sich die Kurvenverläufe sowohl in der fallenden Flanke zum Zeitpunkt 315°KW als auch zum Zündzeitpunkt, da die stabilisierende Wirkung der Wandführung zunimmt, je näher der Kolben dem OT ist. Je früher die Einspritzung erfolgt, umso größer ist der Einfluss der Luftführung auf die Gemischbildung und entsprechend größer sind die Abweichungen von Zyklus zu Zyklus in dieser Phase der Kompression. Bei früherer Einspritzung (ASE 310°KW) unterliegt der Zeitpunkt der fallenden Flanke daher stärkeren Schwankungen, ohne dass die Stabilität des Lambdawertes zum Zündzeitpunkt negativ beeinflusst wird.

Die Lambdaverläufe der entdrosselten Betriebspunkte weisen sowohl in der Phase unmittelbar nach der Einspritzung als auch zum Zündzeitpunkt wesentlich stärkere Schwankungen auf als ihre gedrosselten Vergleichspunkte. Man kann erkennen, dass in einigen Zyklen die Zündgrenzen zum Zündzeitpunkt überschritten werden, so dass davon auszugehen ist, dass die Gemischbildung in diesen Zyklen während des gefeuerten Betriebs zu Zündaussetzern geführt hätte. Eine direkte Korrelation des Druckverlaufs zum Nachweis von Zündaussetzern oder stark verschleppter Verbrennung mit dem Lambdaverlauf ist erst durch den Sensoreinsatz im gefeuerten Motorbetrieb möglich. Dieser Nachweis wird durch eine modifizierte Sensorvariante im folgenden Kapitel erbracht.

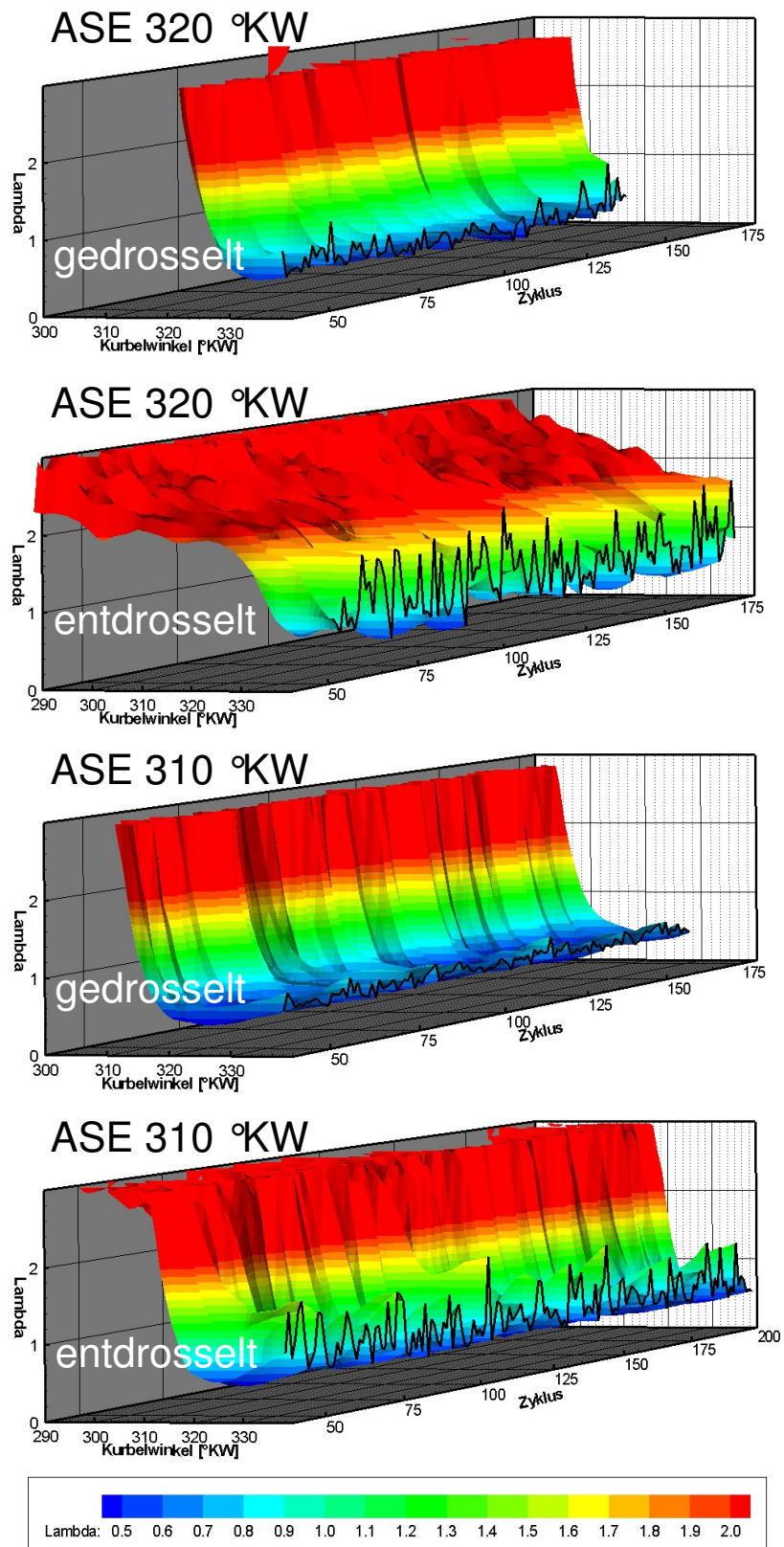


Abbildung 5.17: Einzelzyklenverlauf, Schichtbetrieb 2000 min^{-1} , ASE 320 °KW und 310 °KW, jeweils gedrosselt und entdrosselt

5.2 Infrarotabsorptionssensor mit Zündfunktion

Um motorische Messungen im gefeuerten Betrieb zu ermöglichen, muss das Messsystem um die Zündkerzenfunktionalität erweitert werden. Dies ist realisiert durch eine Miniaturisierung des für die Messstrecke notwendigen Spiegels im Brennraum und den Einbau in eine modifizierte Zündkerze mit exzentrischer Funkenlage.

5.2.1 Aufbau des Messsystems

Das Messsystem besteht aus einer Lichtquelle, dem Sensorkopf mit einer integrierten Detektionseinheit sowie einer Rechneinheit zur Signalwandlung und Datenaufzeichnung. Die Lichtquelle und ein Teil der Verstärkereinheit sind in einem gemeinsamen Gehäuse mit der Rechneinheit untergebracht. Als Lichtquelle dient eine Halogenlampe, deren Licht durch ein nachgeschaltetes Chopperrad mit einer Frequenz von 26 kHz moduliert wird.

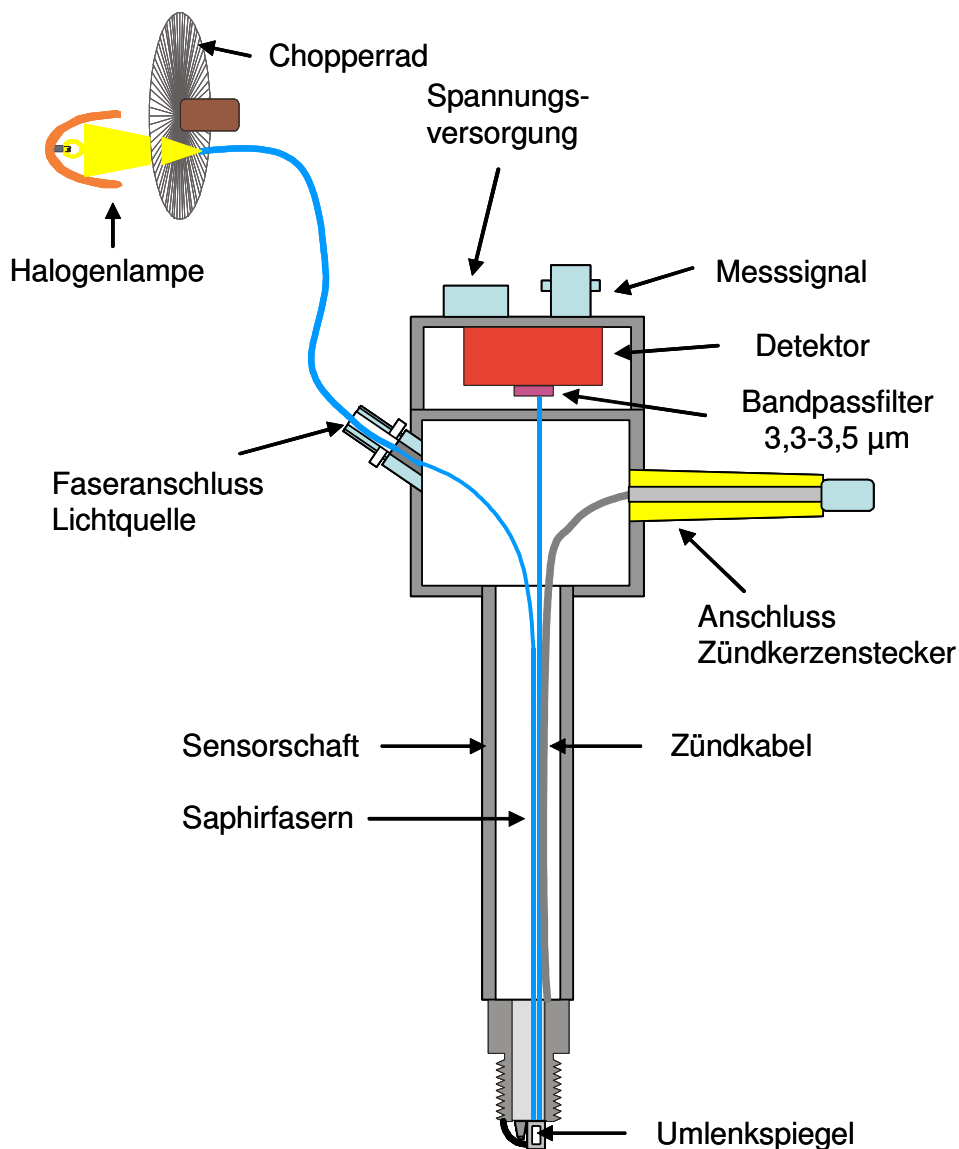


Abbildung 5.18: Prinzipskizze des Sensorkopfes

Abbildung 5.18 zeigt eine Prinzipskizze des Sensorkopfes. Dieser besteht aus einer modifizierten Messzündkerze, wie sie häufig zur Indizierung des Zylinderdrucks verwendet wird, dem Sensorschaft und einer darauf aufgesetzten Detektoreinheit. Durch eine exzentrische Positionierung der Mittelelektrode wird Platz für eine Bohrung geschaffen, die brennraumseitig durch ein Saphirfenster abgeschlossen wird. Das Licht der Halogenlampe wird nach dem Passieren des Chopperrades in eine Saphirfaser eingekoppelt und über den Sensorkopf in den Brennraum eingeführt. Nach der Umlenkung durch einen Metallspiegel und nach dem Passieren der Messstrecke wird das Licht durch eine zweite Faser auf den im Sensorkopf untergebrachten Detektor geleitet. Im Gegensatz zum Aufbau des Sensors ohne Zündkerzenfunktion ist der Spiegel hier nicht verlötet, sondern verschraubt. Dies ist notwendig, da die Beanspruchung des Spiegels im gefeuerten Betrieb deutlich größer als im Schleppbetrieb ist und der Spiegel somit als Verschleißteil ausgewechselt werden kann (siehe Abbildung 5.19).

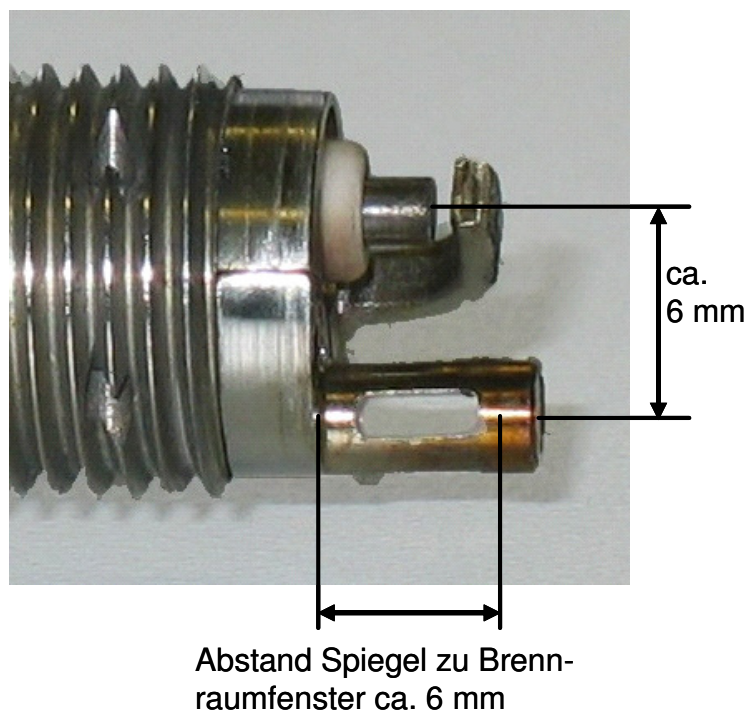


Abbildung 5.19: Foto des Sensorkopfes

Das analoge, vorverstärkte¹⁴ Ausgangssignal des HgCdTe-Detektors wird über eine BNC-Verbindung an die Signalumrechnung weitergeleitet und mit einer Frequenz von 2,5 MHz abgetastet und aufgezeichnet. Die Datenpunkte werden anschließend mit einem Software-Boxcar-Averager (siehe Kapitel 5.1.3) auf ein gemitteltes Signal mit der vom Chopper definierten Fre-

¹⁴ Beim Vorverstärker handelt es sich um einen Wechselspannungsverstärker. Niederfrequente (<1 Hz) bzw. konstante Signalanteile werden nicht verstärkt.

quenz von 26 kHz zusammengefasst. Anschließend erfolgt die kurbelwinkelsynchrone Zuordnung der Messdaten anhand der Signale des Winkelmarkengebers vom Motor.

Die Schaftlänge der Detektoreinheit wurde auf den zur Verfügung stehenden Bauraum in der Kerzenbohrung des Zylinderkopfes angepasst und ragt ca. 4 cm nach oben heraus. Eine konische Kunststoffhülse fixiert den Sensor am Zylinderkopfdeckel, so dass Schwingungen unterbunden werden. Seitlich am Sensorkopf befindet sich der Anschluss für den Zündkerzenstecker. Dieser ist so ausgeführt, dass der Originalzündkerzenstecker mit integrierter Zündspule weiter verwendet werden kann.

Gegenüber der normalerweise verwendeten Gleitfunkenzündkerze mit vier Masse-Elektroden verändert die außermittige Anordnung der Mittelelektrode der Sensorzündkerze die Funkenlage. Untersuchungen mit verschiedenen Messzündkerzen haben gezeigt, dass eine Veränderung der Funkenlage in axialer Richtung deutlich größeren Einfluss auf das Brennverhalten hat als eine seitliche Verschiebung der Elektrode. Bei der Gestaltung der Sondenspitze wurde daher darauf geachtet, die Originalfunkenlage in axialer Richtung beizubehalten. Im Homogenbetrieb konnte in den betrachteten Betriebsbereichen kein Unterschied im Brennverhalten durch den Austausch der Serienzündkerze beobachtet werden. Im Schichtbetrieb ist die Position des Zündfunken durch die räumlich stark eingeschränkte zündfähige Gemischwolke von größerer Bedeutung. In diesem Fall wird der Sensor so montiert, dass die Achse aus Spiegel und Elektrode nahezu parallel zur Motorachse liegt. Bei besonders früher bzw. später Einspritzung sind geringe Unterschiede in der Laufstabilität des Motors im Vergleich zum Betrieb mit einer Standard-Zündkerze zu beobachten. Die Betriebsbereichsgrenzen verschieben sich hier um bis zu $\pm 1^\circ\text{KW}$.

Der tendenziell höhere Wärmewert der Zündkerze hat sich auf den Versuchsbetrieb nicht ausgewirkt, da die Messpunkte motorisch lediglich die untere und mittlere Teillast (< 5 bar Mittel-
druck) abbilden.

5.2.2 Motorische Parameter

Bei dem verwendeten Motor handelt es sich um einen 4-Zylinder 4-Takt FSI®-Forschungsmotor, der sowohl mit interner als auch mit externer Gemischbildung betrieben werden kann und die Möglichkeit besitzt, durch eine im Ansaugkanal befindliche Klappe (LBK) die Ladungsbewegung beim Einströmvorgang gezielt zu beeinflussen. Der Kolben ist gegenüber den aus Serienanwendungen bekannten Muldenkolben geometrisch verändert. Als Kraftstoff wird Isooktan verwendet, da der Motor im Rahmen weiterer Projekte genutzt wird, die auf die Verwendung dieses Einkomponentenkraftstoffs angewiesen sind. Auf die verwendete Absorptionsmessmethode hat dies keinen Einfluss, allerdings hat sich bei einem Vergleich mit Untersuchungen an einem mit Eurosuper betriebenen Serienmotor herausgestellt (siehe Kapitel 5.2.8), dass die Verschmutzung der optischen Bauteile bei Verwendung von Isooktan geringer ausfällt. Die weiteren Motorparameter und Informationen zu den Betriebspunkten sind in Tabelle 5.2 und Tabelle 5.3 dargestellt.

Konstruktionsparameter	
Hub	92,8 mm
Bohrung	84,5 mm
Verdichtung	9,9 : 1

Tabelle 5.2: Daten zum Motor

Allgemein	
Motordrehzahl	2000 min ⁻¹
Lastpunkt	1 bar – 4,5 bar
Zündzeitpunkt	330 °KW – 340 °KW
Homogenbetrieb (FSI)	
Saugrohrdruck	396 mbar – 612 mbar
Einspritzzeitpunkt	40 °KW
Einspritzdauer	0,8 ms - 1,95 ms
Einspritzdruck	75 bar
Schichtbetrieb (FSI)	
Saugrohrdruck	900 mbar
Einspritzzeitpunkt	293 °KW – 308 °KW
Einspritzdauer	0,9 ms - 1,0 ms
Einspritzdruck	75 bar
MPI-Betrieb	
Saugrohrdruck	375 mbar – 577 mbar
Einspritzzeitpunkt	-360 °KW
Einspritzdauer	4,2 ms - 7,5 ms
Einspritzdruck	6 bar

Tabelle 5.3: Betriebspunkte mit Motorzündung, IR-Absorptionssensormessungen

5.2.3 Versuchsdurchführung

Die nachfolgend beschriebenen Versuche wurden an Motoren durchgeführt, deren Ansteuerung durch Applikationsmotorsteuergeräte erfolgt. Diese übernehmen neben den Basisfunktionen wie der direkten Ansteuerung von Drosselklappe, Einspritzpumpe, Einspritzventilen und Zündung noch zahlreiche weitere Regelungs- und Überwachungsfunktionen des Motors und seiner angrenzenden Peripherie. Da diese übergeordneten Funktionen die Basisfunktionen unmittelbar beeinflussen, ist es wichtig, diese vor Versuchsbeginn abzuschalten, um freien Zugriff auf das Einspritztiming und die Zündung zu bekommen. Weiterhin hat es sich als sinnvoll herausgestellt, die zu vermessenden Betriebspunkte zunächst ohne montierte Messzündkerze anzufahren, um die notwendigen Betriebsparameter im Vorfeld der eigentlichen Messung zu bestimmen. Dies trägt dazu bei, den gefeuerten Motorbetrieb mit eingesetzter Messzündkerze so kurz wie möglich zu halten, da der Spiegel an der Spitze des Sensors während des Betriebs verschleißt. Ebenso sind lange ungezündete Schleppphasen des Motors zu vermeiden, da sich im Brennraum befindlicher Restkraftstoff und Öl auf dem Fenster der Messstrecke und dem Spiegel niederschlägt und so zu einer verminderten Signalausbeute führt. Zwar brennt sich dieser Film mit der Aufnahme des gefeuerten Betriebs wieder ab, allerdings bleiben zum Teil Rückstände zurück, die nur durch einen Ausbau des Sensor und anschließendes Reinigen mit geeigneten Scheuermitteln entfernt werden können. Lang andauernder Motorbetrieb bei hohen Lasten führt ebenfalls zu erhöhtem Verschleiß der Sensorspitze, in Folge dessen der Spiegel seine Reflektivität irreversibel verliert und anschließend ersetzt werden muss.

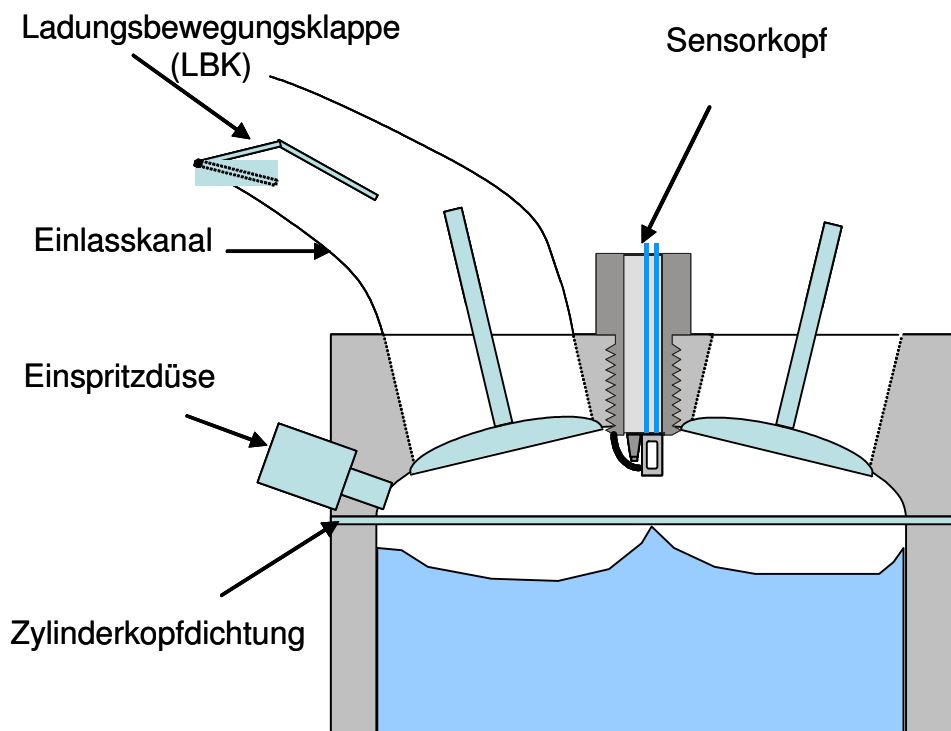


Abbildung 5.20: Einbaulage des Sensorkopfes

Die Abbildung 5.20 zeigt schematisch die Position des eingebauten Sensorkopfes im Brennraum

sowie die Position der Ladungsbewegungsklappe (LBK) im Ansaugkanal. Die Stellung der Ladungsbewegungsklappe bestimmt den Querschnitt des Ansaugkanals und hat somit großen Einfluss auf die Ladungsbewegung beim Einströmungsvorgang der angesaugten Frischluft in den Brennraum. Ist die Ladungsbewegungsklappe geschlossen, kann die Luft nur durch den oberen Teil des Ansaugkanals strömen. Dies bewirkt zum einen höhere Strömungsgeschwindigkeiten als bei vollständig geöffnetem Ansaugkanal und zum anderen erhöht sich die Intensität der walzenförmigen Tumbleströmung im Brennraum, da ein Großteil der Luft über den oberen Ventilrand einströmt und die Ausbildung der Tumbleströmung begünstigt.

Zunächst wird der gewünschte Betriebspunkt, definiert durch Saugrohrdruck, Einspritzdauer und -zeitpunkt, Stellung der Ladungsbewegungsklappe sowie den Zündzeitpunkt, eingestellt. Anhand der parallel durchgeführten Zylinderdruckindizierung kann überprüft werden, ob das Brennverhalten durch die exzentrische Lage der Zündkerzenelektrode beeinflusst wird. Im Rahmen der hier durchgeführten Messungen konnten jedoch keine vom Sensor verursachten signifikanten Unterschiede im Brennverhalten festgestellt werden. Die Synchronisation von Messsystem und Motor erfolgt über einen Winkelmarkengeber an der Kurbelwelle. Nach dem Auslösen der Messung werden 100 aufeinander folgende Motorzyklen mit einer Auflösung von 1°KW aufgezeichnet. Bei den nachfolgend dargestellten Kurvenverläufen handelt es sich um Mittelwerte aus 100 Einzelzyklen, sofern nicht anders angegeben.

5.2.4 Näherungsverfahren zur Lambdabestimmung im gefeuerten Betrieb

In Abbildung 5.21 ist die Detektorspannung für einen gesamten Motorzyklus im Homogenbetrieb dargestellt. Die detektierte Strahlung ist die Überlagerung des abgeschwächten Lichts der Halogenlampe, der thermischen Hintergrundstrahlung des Motors sowie des thermischen Eigenleuchtens des Kraftstoffs. Im Vergleich zu der in Kapitel 5.1.3 vorgestellten Auswertung bei geschlepptem Motor ist der Signalhintergrund im hier dargestellten gefeuerten Betrieb deutlich stärker. Gegenüber den Messungen im geschleppten Betrieb ist die Chopperfrequenz daher auf 26 kHz verfünffacht. Der rötlich gekennzeichnete Bereich des Detektorspannungsverlaufs ist in Abbildung 5.21 vergrößert hervorgehoben.

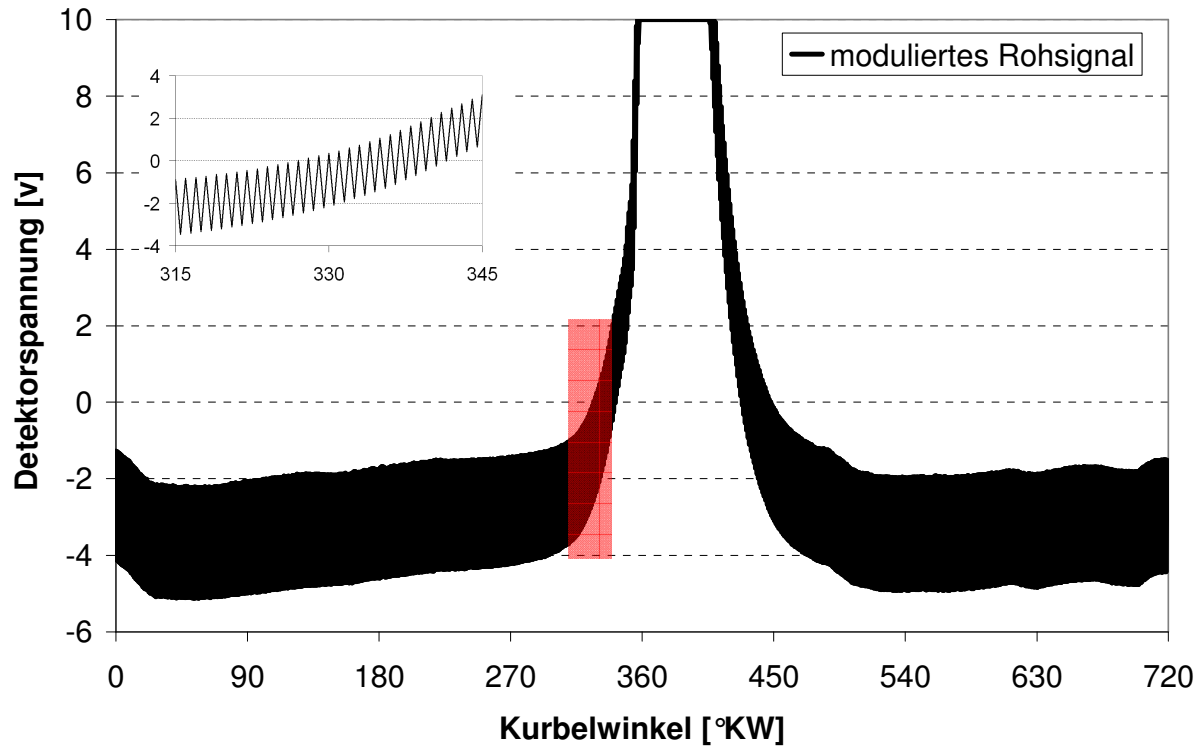


Abbildung 5.21: Detektorspannung, vollständiger Motorzyklus

Die Bildung der Signaldifferenz zu den Zeitpunkten „Licht an“ und „Licht aus“ bereinigt das Messsignal um den Einfluss der Hintergrundstrahlung, da diese bei hohen Modulationsfrequenzen zwischen zwei Messpunkten als konstant angesehen werden kann. Im Vergleich zu den Messungen bei geschlepptem Motor übertreffen die zeitlichen Gradienten des Hintergrundsignals bei gefeuertem Motorbetrieb die des ungefeuerten Betriebs um eine Größenordnung, da die Oberflächentemperaturen im Brennraum durch die Verbrennung höher sind und die Gemischtemperaturen deutlich stärker variieren als im Schleppbetrieb. Beim Einsetzen der Verbrennung dominiert daher die Eigenemission des Kraftstoffs das Messsignal. Dies führt bei zu geringer Chopperfrequenz dazu, dass die zusätzliche Detektorspannung durch das eingestrahlte Licht nicht von der überlagerten Hintergrundstrahlung getrennt werden kann.

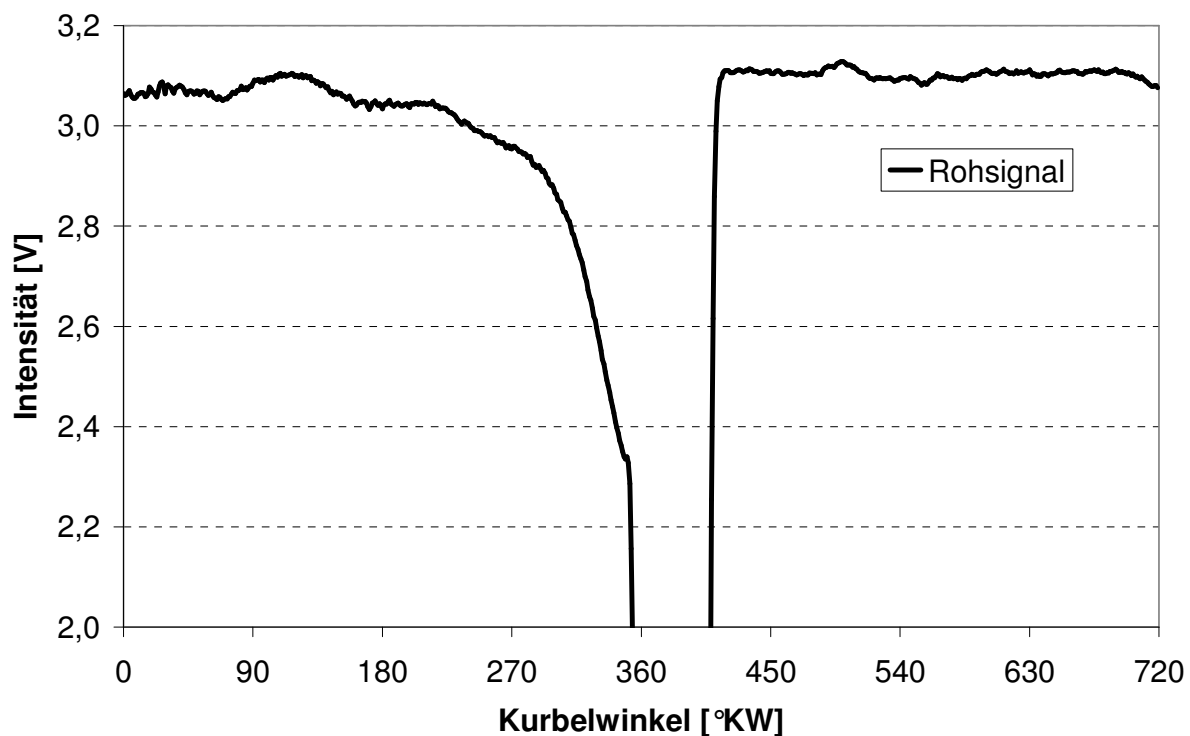


Abbildung 5.22: Rohsignalverlauf, gefeuerter Homogenbetrieb, Mittelwert aus 100 Zyklen

Die Abbildung 5.22 zeigt das Ergebnis der Differenzbildung der Signalintensitätsniveaus der Detektorspannung, den so genannten Rohsignalverlauf, für einen Betriebspunkt mit früher Direkteinspritzung. Dargestellt ist die Differenz der Detektorspannungen über dem Kurbelwinkel, wobei 360°KW dem oberen Totpunkt des Arbeitstaktes (Zünd-OT) entspricht.

Zu Beginn des Motorzyklus befindet sich das Rohsignal auf hohem Niveau, da die Kraftstoffkonzentration im Brennraum zu diesem Zeitpunkt gering ist. Zum Zeitpunkt 30°KW ist die Kraftstoffeinspritzung bereits erfolgt und die Gemischverteilung ist noch sehr inhomogen. Dies führt zu starken Schwankungen der Kraftstoffkonzentration in der Messstrecke, die sich sogar im gemittelten Signalverlauf widerspiegeln. Im weiteren zeitlichen Verlauf schließen die Einlassventile (220°KW), und die Kraftstoffkonzentration nimmt durch den steigenden Brennraumdruck während der Verdichtung kontinuierlich zu. Die Zündung erfolgt zum Zeitpunkt 340°KW. Als Folge der nun einsetzenden Verbrennung erhöht sich die Temperatur im Brennraum so stark, dass der Detektor durch das nun dominante Hintergrundsignal in Sättigung geht und eine Messung verhindert. Erst nach der Verbrennung des Kraftstoffs in der Expansionsphase sinkt das Hintergrundsignal stark ab, so dass die Signalspannung wieder detektiert werden kann.

Um aus dem Rohsignalverlauf auf den Zeitverlauf der Kraftstoffkonzentration schließen zu können, wird zunächst ein Absorptionsverlauf nach Lambert-Beer berechnet (siehe Kapitel 3.2.1, Gleichung 3.19). Die Intensität I entspricht dem gemessenen Rohsignal zum jeweiligen Kurbelwinkel, so dass zur Berechnung der Konzentration c der Absorptionskoeffizient σ_λ , die Länge der Absorptionsstrecke L sowie die Bezugsintensität I_0 bekannt sein müssen. Aufgrund der verwen-

deten breitbandigen Anregung kann der Wert des Absorptionskoeffizienten von Kohlenwasserstoffen als näherungsweise unabhängig von den Druck- und Temperaturänderungen, wie sie während des Verdichtungsaktes im Verbrennungsmotor auftreten, angenommen werden (siehe Kapitel 3.2.3). Dieser wird daher zusammen mit der Weglänge der Absorptionsstrecke zunächst als eins angenommen und kann anschließend durch Kalibriermessungen bestimmt werden. Für eine schmalbandige Anregung wurde von Kawahara et al. gezeigt, dass der Absorptionskoeffizient von den Umgebungsbedingungen abhängig ist und eine Vereinfachung in einem solchen Fall nicht zulässig wäre [70].

Bei der Bestimmung der Bezugsintensität I_0 werden von der Art der Gemischbildung abhängige unterschiedliche Vorgehensweisen gewählt. Per Definition entspricht I_0 der Intensität der Strahlung, die ohne ein abschwächendes Medium gemessen wird. Um I_0 während des Motorbetriebs bestimmen zu können, muss ein Zeitpunkt gewählt werden, zu dem die Kraftstoffkonzentration so gering wie möglich ist. Bei externer Gemischbildung und bei interner Gemischbildung im Homogenbetrieb hat sich die Bestimmung des Maximalwertes der Signalintensität innerhalb des Kurbelwinkelintervalls von 650°KW bis 710°KW als besonders geeignet erwiesen. Zu diesem Zeitpunkt ist die Verbrennung bereits abgeschlossen und ggf. ausgasender Restkraftstoff aus Spalten oder Ventilsitzen ist bereits ausgeschoben, so dass die Mengen unverbrannten Kraftstoffs in der Messstrecke minimal sind. Bei interner Gemischbildung im Schichtbetrieb sind die spezifischen HC-Emissionen während der Ausschubphase in der Regel größer als im Homogenbetrieb, daher wird I_0 hier im Bereich des unteren Totpunkts des Ladungswechselzyklus bestimmt. Ggf. vorhandener Restkraftstoff aus einer unvollständigen Verbrennung des Vorgängerzyklus ist zu diesem Zeitpunkt bereits ausgeschoben und mit der angesaugten Frischluft verdünnt, so dass die Restkraftstoffkonzentration zu diesem Zeitpunkt im Motorzyklus vor der Einspritzung am geringsten ist.

Dennoch befindet sich auch bei den eben genannten Verfahren noch Restkraftstoff zum Zeitpunkt der I_0 -Bestimmung in der Messstrecke. Um dessen Einfluss auf die Messung zu minimieren, wird im weiteren Verlauf der Auswertung eine Korrektur der berechneten Konzentration durch eine Abschätzung der Restkraftstoffkonzentration anhand von Messungen der HC-Emissionen mittels konventioneller Prüfstandsmesstechnik durchgeführt. Da dies lediglich eine vertikale Verschiebung des Konzentrationsverlaufs zur Folge hat, erfolgt eine detaillierte Beschreibung im weiteren Verlauf des Kapitels.

Der in Abbildung 5.23 dargestellte Verlauf der Absorption resultiert aus der Umrechnung des Rohsignalverlaufs aus Abbildung 5.22 gemäß Gleichung 3.20 und ist proportional zur Kraftstoffkonzentration am Messort. Wie schon bei der Interpretation des Rohsignalverlaufs erläutert wurde, ist der steile Anstieg der Absorption im Bereich der Kompression auf die Dichteänderung des Kraftstoffs durch die Kolbenbewegung zurückzuführen. Für die Beantwortung motorischer Fragestellungen ist allerdings neben der Kraftstoffkonzentration oder deren Änderung über dem Kurbelwinkelverlauf vor allem das zeitaufgelöste Luft-Kraftstoff-Verhältnis von Interesse.

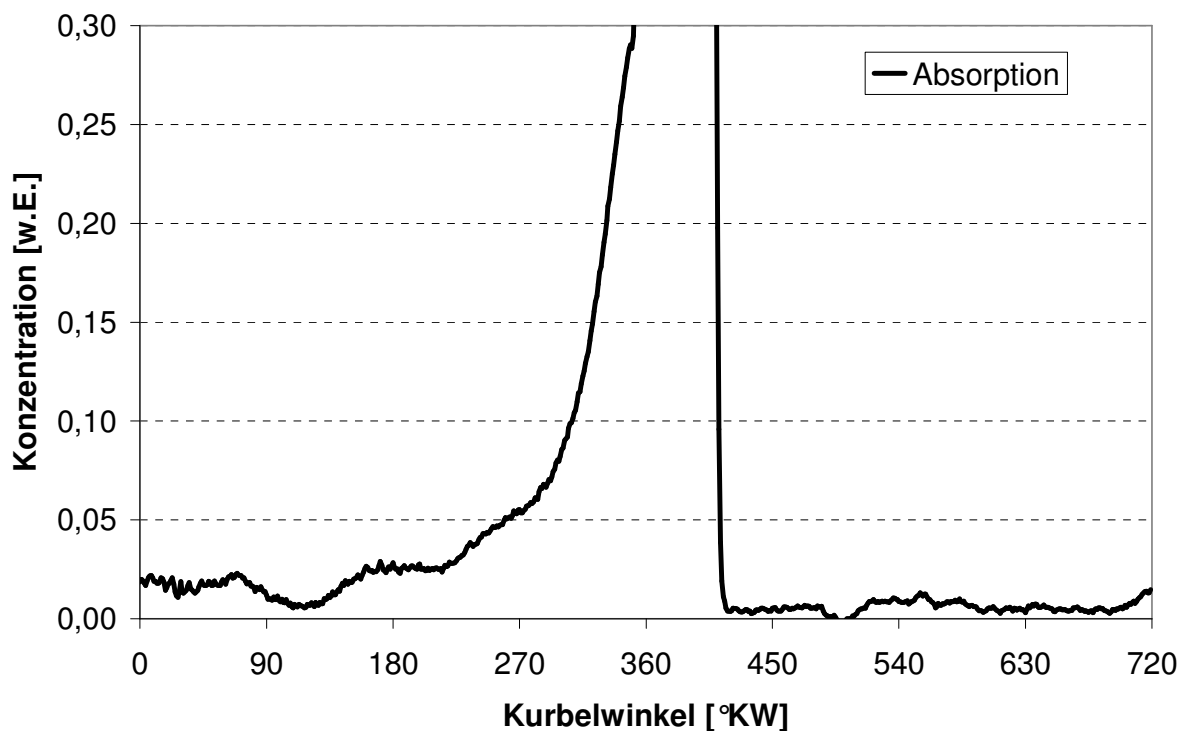


Abbildung 5.23: Absorptionsverlauf, gefeuerter Homogenbetrieb, Mittelwert aus 100 Zyklen

Aus diesem Grund muss das Signal um die Dichteänderung während der Kompression korrigiert werden. Dies gelingt durch die Multiplikation der soeben berechneten Absorption mit dem Brennraumvolumen, das aus den kinematischen Randbedingungen berechnet werden kann (siehe Kapitel 5.1.6 Gleichung 5.9). Unter der Annahme, dass die angesaugte Luftmenge homogen im Brennraum verteilt ist, stellt das Ergebnis eine auf konstante Dichte korrigierte Absorption dar, die umgekehrt proportional zum Luft-Kraftstoff-Gemisch λ ist und im Folgenden als korrigierte Absorption bezeichnet wird.

Die Abbildung 5.24 zeigt den Vergleich der korrigierten mit der nicht korrigierten Absorption aus Abbildung 5.23 im Bereich der Kompression. Aus Darstellungsgründen ist der Kurvenverlauf der korrigierten Absorption auf das Zylindervolumen bei 275°KW normiert, daher schneiden sich hier die Kurven. Die korrigierte Absorption weist zu Zeitpunkten später als 240°KW nur noch sehr geringe Schwankungen auf. Das bedeutet, dass der Anstieg der Absorption (gestrichelte Kurve) nicht auf wesentliche Änderungen der lokalen Gemischzusammensetzung zurückzuführen ist, sondern lediglich auf der Kompression des Gemisches beruht.

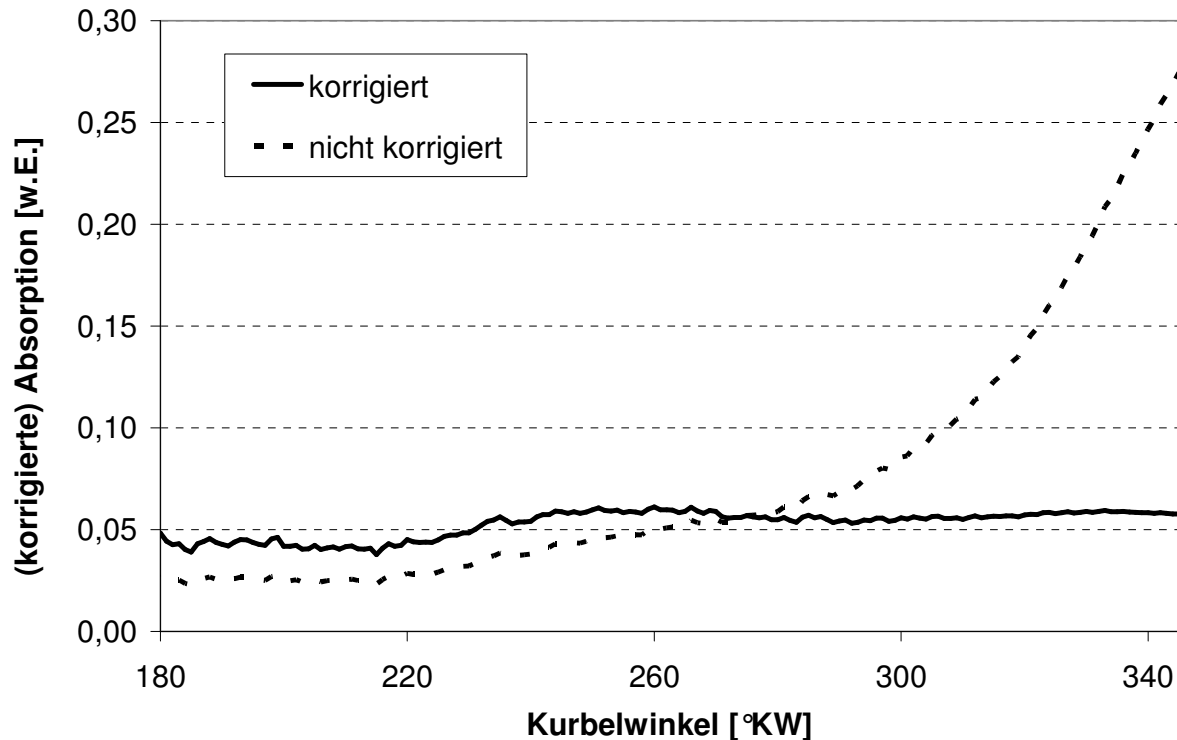


Abbildung 5.24: auf konstante Dichte korrigierte Absorption, gefeuerter Homogenbetrieb, Mittelwert aus 100 Zyklen

Um aus der relativen Größe der korrigierten Absorption eine quantitative Konzentration und daraus Lambda berechnen zu können, bedarf es der genauen Kenntnis des Absorptionskoeffizienten, der für Realkraftstoffe nicht vollständig zur Verfügung steht. Wie bereits bei der Beschreibung der ungefeuerten Versuche erläutert, wird daher eine Kalibrierfunktion verwendet, die unter der Annahme der homogenen Verteilung unterschiedlicher Kraftstoffkomponenten im Brennraum durch Auswahl geeigneter Betriebsparameter im Motorbetrieb ermittelt werden kann.

Um diese Kalibrierfunktion zu erhalten, aus der eine eindeutige Zuordnung zwischen der gemessenen korrigierten Absorption und dem Luft-Kraftstoff-Verhältnis des Gemisches hervorgeht, wird eine Reihe von Messungen unter Variation des globalen Lambdas innerhalb der Zündgrenzen durchgeführt. Dies erfolgt zum einen durch eine Parametrierung der Ansteuerdauer der Einspritzung bei konstantem Saugrohrdruck und in einer weiteren Messreihe durch Variation des Saugrohrdrucks bei konstanter Einspritzmenge. Der Einfluss eventueller Schwankungen der Restgaskonzentrationen wird zunächst nicht berücksichtigt.

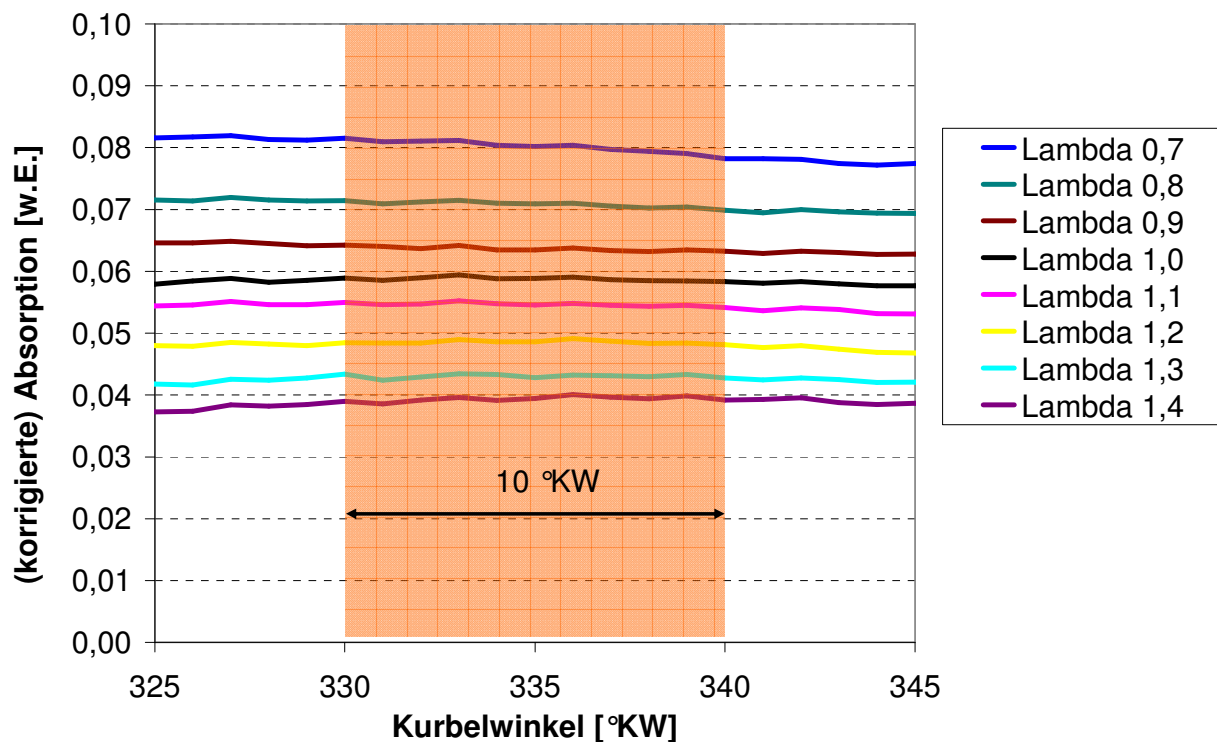


Abbildung 5.25: korr. Absorptionsverläufe, Mittelwert aus jeweils 100 Zyklen, Mittelung der Einzelkurven innerhalb des orange markierten Intervalls zur Bestimmung der Kalibrierwertepaare

Die Abbildung 5.25 zeigt die korrigierten Absorptionsverläufe einer Mittelung aus jeweils 100 Messzyklen für eine Variation der eingespritzten Kraftstoffmenge bei konstantem Saugrohrdruck innerhalb der motorischen Zündgrenzen. Daraus geht hervor, dass die relative Lage der Absorptionsverläufe zueinander dem Verhältnis der eingespritzten Kraftstoffmengen entspricht. Die größte Absorption wird daher erwartungsgemäß beim fettesten und die niedrigste Absorption beim magersten Betriebspunkt gemessen. Da sich die Kraftstoffkonzentration in der hier dargestellten späten Phase der Kompression kaum noch verändert, wird davon ausgegangen, dass die lokale Gemischzusammensetzung in der Messstrecke zu diesem Zeitpunkt mit der globalen Gemischzusammensetzung übereinstimmt. Diese ist aus Messungen der Motorlambdasonde bekannt, und somit bilden jeweils der Mittelwert der Absorption des in Abbildung 5.25 orange dargestellten Intervalls und der Lambdawert eine Stützstelle der Kalibrierfunktion.

Die Abbildung 5.26 zeigt die vorläufige berechnete Kalibrierfunktion, die nahezu einen $1/x$ -Verlauf aufweist, wie er aus der Theorie aufgrund der reziproken Abhängigkeit des Lambdawertes von der Kraftstoffdichte zu erwarten ist. Diese Kurve ist zunächst nur für Betriebspunkte gültig, die mit dem gleichen Saugrohrdruck gemessen wurden. Wird der Saugrohrdruck variiert, muss dies bei der Auswertung berücksichtigt werden.

Die Abbildung 5.27 zeigt den Zusammenhang zwischen Lambda und der gemessenen korrigierten Absorption für eine Variation von Lambda durch Veränderung des Saugrohrdrucks.

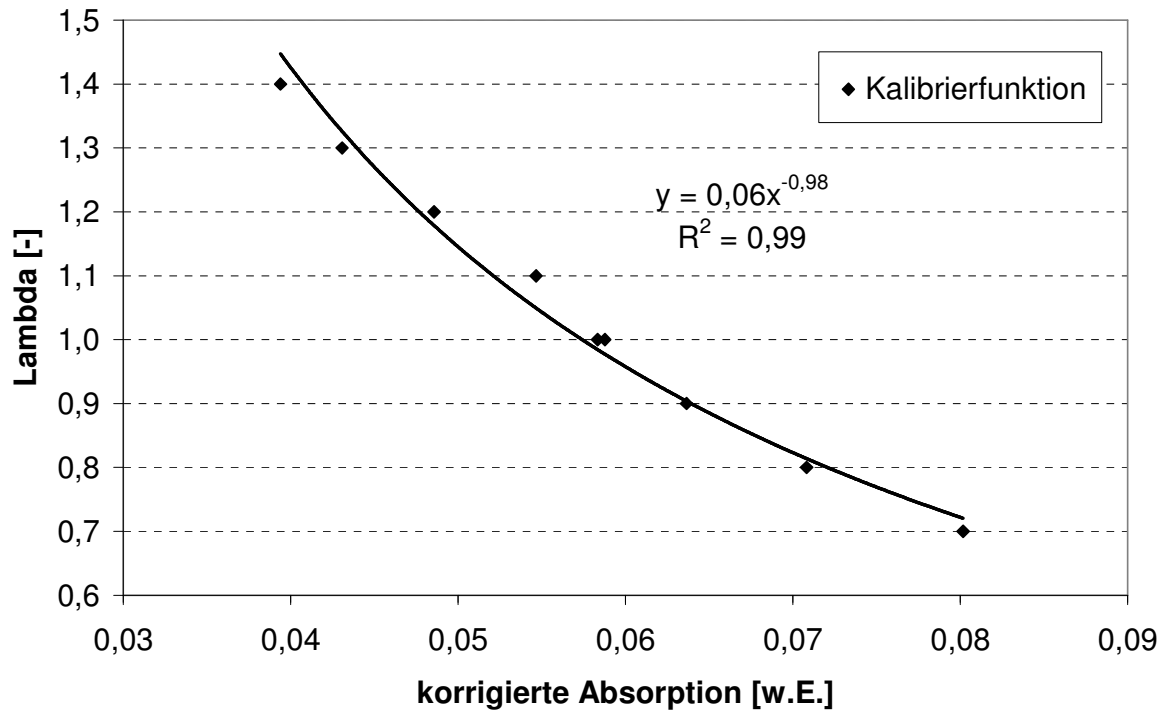


Abbildung 5.26: vorläufige Kalibrierfunktion, gefeuerter Motorbetrieb

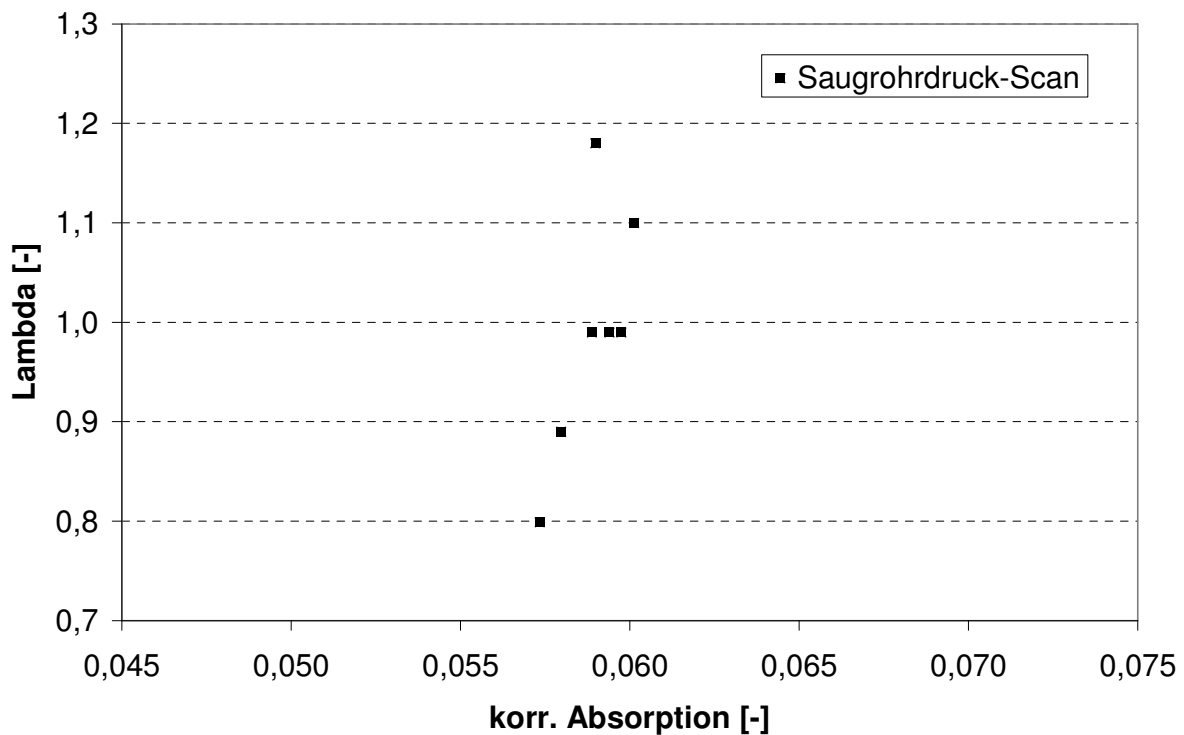


Abbildung 5.27: korrigierte Absorption, Saugrohrdruck-Scan, gefeuerter Homogenbetrieb

Im Gegensatz zu Abbildung 5.26 ist hier kein $1/x$ -Verlauf zu erkennen, da die für die Messgröße

Absorption relevante eingespritzte Kraftstoffmenge konstant ist. Die gewünschte Zuordnung Absorption-Lambda lässt sich erst mit Hilfe der bezogenen Absorption herstellen. Diese wird durch die Berücksichtigung des Einflusses des Saugrohrdrucks auf die Luftmenge im Zylinder und somit auf die Gemischzusammensetzung aus der korrigierten Absorption berechnet (siehe Gleichung 5.10).

Bei näherer Betrachtung der Abbildung 5.27 fällt auf, dass die korrigierte Absorption trotz konstanter Einspritzmengen bei einem Lambda von ca. 1,1 ein Maximum aufweist und zu den mageren und fetten Randbereichen des Zündfensters hin abfällt. Dieser Effekt ist auf den bereits am Anfang des Kapitels erwähnten Einfluss von Restkraftstoff in der Messstrecke während der I_0 -Bestimmung zurückzuführen. Aus der Literatur ist bekannt, dass die spezifischen HC-Rohemissionen vom Luft-Kraftstoff-Verhältnis abhängig sind [6]. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 5.28 dargestellt und kann in erster Näherung durch ein Polynom 2. Ordnung approximiert werden.

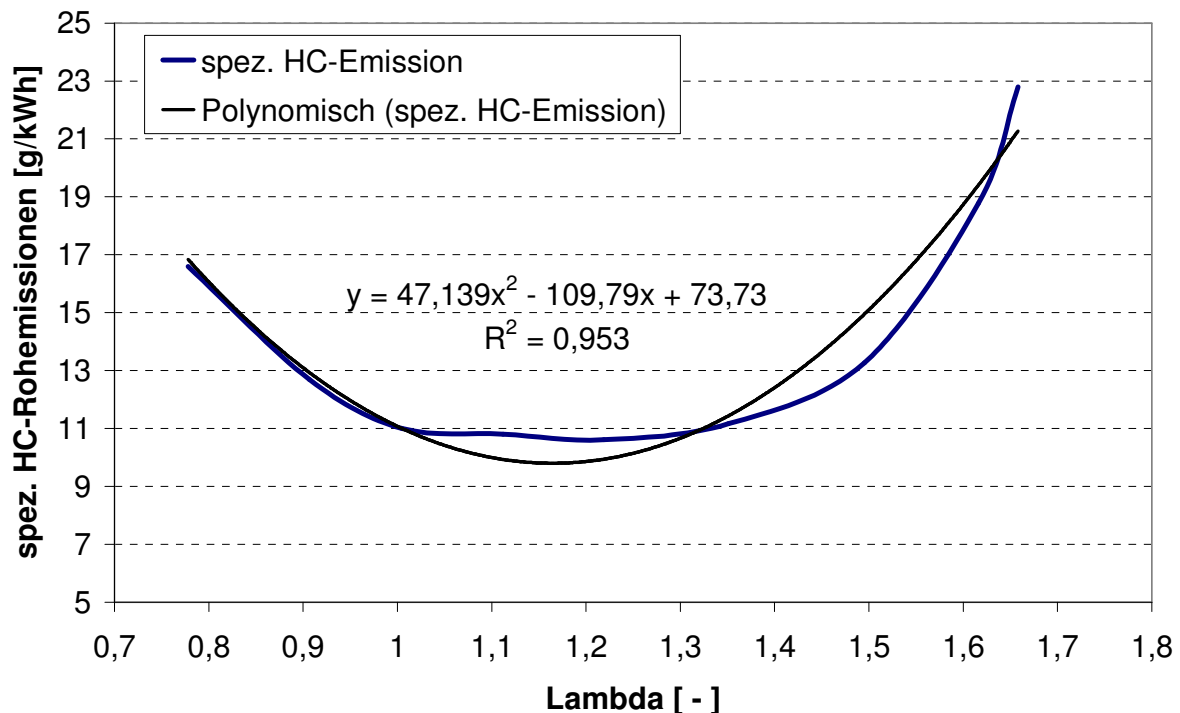


Abbildung 5.28: Abhängigkeit HC-Emissionen / Lambda [15]

Es ist davon auszugehen, dass der im Brennraum verbleibende Kraftstoffanteil proportional zu den im Abgas gemessenen HC-Rohemissionen ist. Daraus folgt, dass die Beeinflussung der Bezugsintensität I_0 bei besonders mageren und fetten Betriebspunkten größer ist als bei den Betriebspunkten im Bereich der stöchiometrischen Gemischzusammensetzung.

Sind die HC-Emissionen aus Messungen mittels Prüfstandsmesstechnik bekannt, kann eine Abschätzung des Effekts auf die Bestimmung der Bezugsintensität, wie nachfolgend beschrie-

ben, bestimmt werden:

$$I = I^* \cdot e^{-k \cdot c_{\text{gesamt}}} \quad (5.11)$$

$$I_0 = I^* \cdot e^{-k \cdot c_{\text{rest}}} \quad (5.12)$$

k ist eine Konstante und entspricht dem Produkt aus dem Absorptionskoeffizienten und der Absorptionsstrecke. I^* ist definiert als die Intensität ohne jegliche Abschwächung, c_{gesamt} entspricht der Gesamtkonzentration des absorbierenden Kraftstoffs. c_{rest} ist definiert als die Kraftstoffkonzentration, die zum Zeitpunkt der Bestimmung von I_0 noch in der Messstrecke vorhanden ist und die für die oben beschriebenen Abweichungen verantwortlich ist. Substituiert man I^* in Gleichung 5.12 durch den Zusammenhang aus Gleichung 5.11, so ergibt sich die Gleichung 5.13.

$$k \cdot c_{\text{gesamt}} = -\ln \frac{I}{I_0} + k \cdot c_{\text{rest}} \quad (5.13)$$

Unter der Annahme, dass sich die mittlere Restkraftstoffkonzentration im Abgas zwischen der Messstrecke im Brennraum und der Abgasentnahmestelle im Auspuffkrümmer nicht mehr signifikant verändert und somit aus der Abgasanalyse¹⁵ bekannt ist, enthält die Gleichung für den Zeitraum kurz vor der Zündung lediglich 2 unbekannte Größen, nämlich c_{gesamt} und die Konstante k . Da das Luft-Kraftstoff-Gemisch kurz vor der Zündung weitgehend homogenisiert ist (siehe Abbildung 5.25), kann die Gesamtkonzentration aus dem bekannten globalen Lambdawert berechnet werden¹⁶. Führt man die Berechnung für eine Serie von Betriebspunkten durch, so kann k durch Mittelung der Ergebnisse bestimmt werden. Für die Bestimmung der Gesamtkonzentration zu beliebigen Zeitpunkten im Motorzyklus kann der Einfluss des Restkraftstoffs während der I_0 -Bestimmung durch Addition des nun bekannten Terms $k \cdot c_{\text{rest}}$ kompensiert werden. Bei der Auswertung der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche hat sich herausgestellt, dass c_{rest} bei seriennahen Motoren ca. 2% – 6% der Gesamtkonzentration beträgt.

Ist die Restkraftstoffkonzentration im Abgas nicht aus Messungen bekannt, so kann diese dennoch abgeschätzt werden. Hierzu wird die Restkraftstoffkonzentration durch deren Abhängigkeit vom globalen Lambda und die in Abbildung 5.28 dargestellte Näherungskurve approximiert. Die hierfür benötigte Spreizung der Parabel und deren Fußpunkt können anhand der gemessenen Konzentrationen einer Lambdavarisation bei konstanter Einspritzmenge bestimmt werden. In Abbildung 5.29 sind in schwarz die Punkte eines Lambda-Scans aufgetragen. Man erkennt deut-

¹⁵ Die HC-Emissionen werden am Prüfstand mittels Flammenionisationsdetektor (FID) gemessen. Die Messgröße ist der in den Kohlenwasserstoffverbindungen enthaltene Wasserstoff. Die Konzentration wird anschließend in ein C₃H₈-Äquivalent umgerechnet.

¹⁶ Die Berechnung erfolgt ebenfalls als C₃H₈-Äquivalent. Die entsprechende Formel befindet sich im Anhang.

lich, dass die Messung der Absorption trotz konstanter Einspritzmengen und somit gleicher Kraftstoffkonzentrationen im Bereich magerer und fetter Punkte zu niedrig ausfällt. Die roten Dreiecke zeigen die gleichen Messwerte, wobei hier die Restkraftstoffkonzentration zum Zeitpunkt der Bestimmung der Referenzintensität durch das oben beschriebene Verfahren kompensiert wird. Fällt die Kompensation durch die Wahl einer ungeeigneten Näherungsparabel zu stark aus, so ist dies, wie im Fall der hier blau dargestellten Punkte, unmittelbar durch die zu große Abweichung von einer Senkrechten zu erkennen.

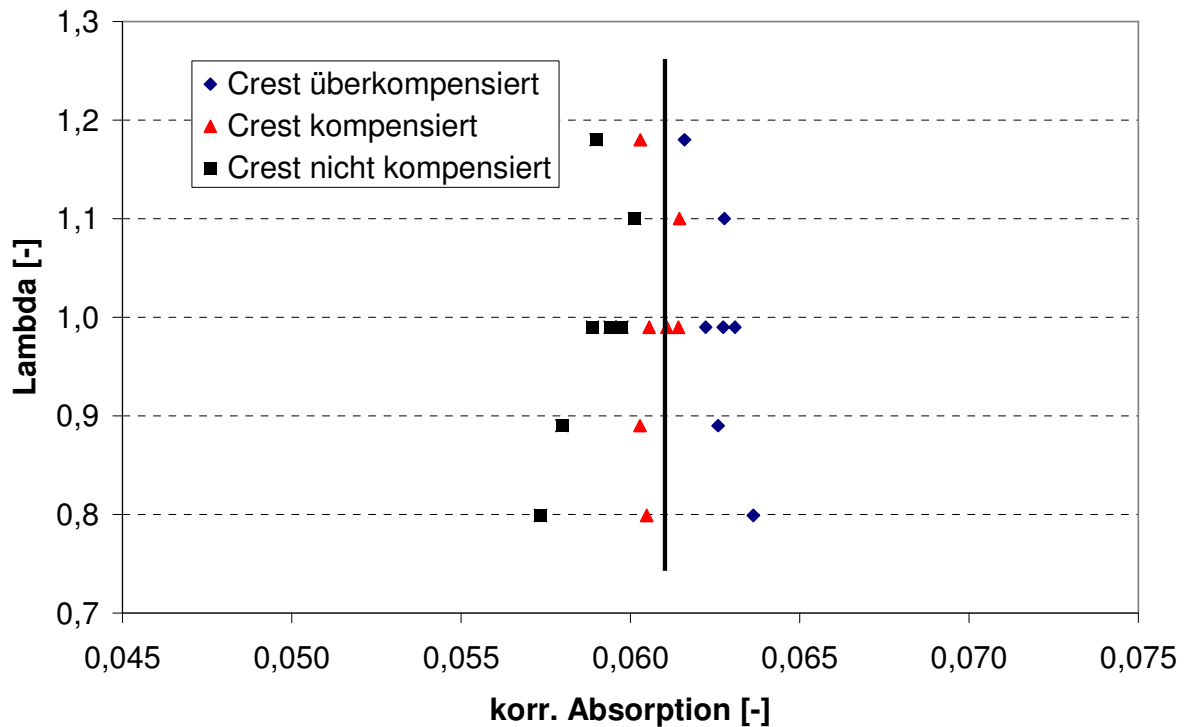


Abbildung 5.29: Kompensation des Restkraftstoffs bei der I_0 -Bestimmung, gefeuerter Homogenbetrieb

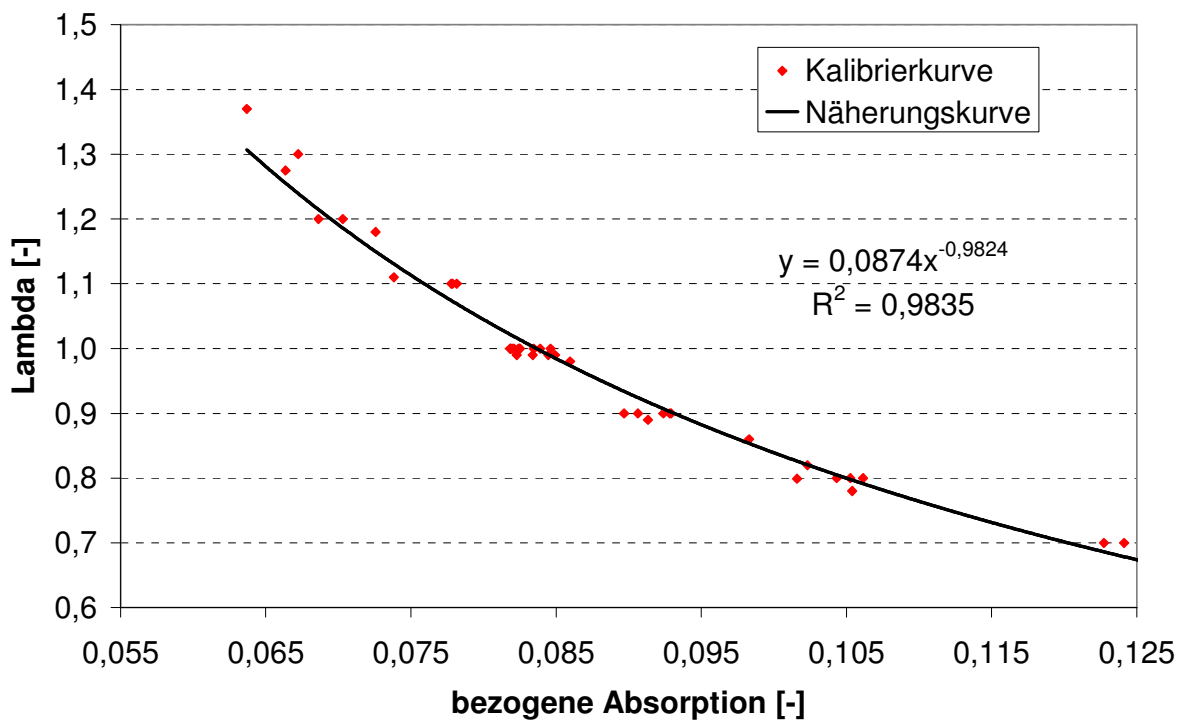


Abbildung 5.30: Kalibrierkurve, bezogene Absorption – Lambda, gefeuerter Motorbetrieb

Für die Durchführung der Kalibrierung und zur Bestimmung der Restkraftstoffkonzentration werden jeweils 100 Einzelzyklen berechnet und anschließend gemittelt. Insbesondere bei sehr mageren und sehr fetten Betriebspunkten ist darauf zu achten, dass nur diejenigen Zyklen zur Auswertung herangezogen werden, deren Vorgängerzyklen keine Zündaussetzer oder nur sehr schwache Verbrennung aufweisen, da sonst der Messwert der Absorption durch eine zu ungenaue Bestimmung der Bezugsintensität beeinflusst wird. Dies hat zur Folge, dass das globale Lambda zum Zündzeitpunkt nicht notwendigerweise mit dem globalen Messwert der Lambda-sonde übereinstimmt und die Kompensation der Restkraftstoffkonzentration zu gering ist. Die Selektion der auswertbaren Zyklen erfolgt anhand der gemessenen Zylinderdrücke. Es werden nur die Zyklen ausgewertet, deren Mitteldruck mindestens 50% des Zyklus mit dem maximalen Mitteldruck erreicht.

Die in Abbildung 5.30 dargestellte Kalibrierkurve enthält daher nur Messpunkte, deren Standardabweichung des indizierten Mitteldrucks kleiner als 0,8 bar ist und bildet die Basis für die Umrechnung der gemessenen Absorptionswerte in die im weiteren Verlauf des Kapitels dargestellten Lambdaverläufe.

5.2.5 Homogenbetrieb (FSI)

Die nachfolgend dargestellten Verläufe von Lambda wurden im so genannten Homogenbetrieb ermittelt. Hierbei wird der Motor mit interner Gemischbildung betrieben, wobei die Einspritzung zu einem frühen Zeitpunkt während der Ansaugphase erfolgt (hier ASB 30°KW).

In Abbildung 5.31 und Abbildung 5.32 sind die aus 100 Einzelzyklen gemittelten Verläufe einer Lambdavariation mittels Variation der Einspritzmenge bzw. des Saugrohrdrucks dargestellt. Die Auswertung der Rohdaten ist nach dem oben beschriebenen Verfahren durchgeführt worden. Die Ladungsbewegungsklappe (LBK) ist vollständig geschlossen, so dass die untere Hälfte des Einlasskanals blockiert ist, um die Strömungsgeschwindigkeiten im oberen Teil des Kanals zu erhöhen. Das Ergebnis ist eine starke Tumbleströmung, die dazu führt, dass die Gemischhomogenisierung bereits sehr früh einsetzt. Der Messpunkt mit einem Lambdawert von 1,0 wurde dreimal, am Anfang, in der Mitte und am Ende der Serie von Messpunkten, gemessen. Die Übereinstimmung der Kurvenverläufe zeigt, dass das Verfahren robust ist gegenüber Verschmutzungen der optischen Komponenten, die während des Messbetriebs auftreten. Der Zündzeitpunkt der mageren Betriebspunkte erfolgt 10°KW früher als bei den stöchiometrischen und fetten Betriebspunkten (340°KW), daher endet der Kurvenverlauf mit der entsprechend früher einsetzenden Verbrennung.

Die Verläufe der verschiedenen Messpunkte staffeln sich gemäß ihrer globalen Gemischzusammensetzung und sind lediglich im Niveau verschoben. Eine Ausnahme bildet der Verlauf der Kurve bei einem Lambda von 1,35, der sich nur sehr geringfügig von dem Betriebspunkt mit einem Lambda von 1,3 unterscheidet. Durch den sehr mageren Motorbetrieb an der Zündgrenze treten bereits vermehrt Zündaussetzer auf, die sich negativ auf die Bestimmung des Lambdawertes aus der Abgaszusammensetzung auswirken. Durch den hohen Sauerstoffgehalt im Abgas bei Zündaussetzern wird der Lambdawert zu hoch angenommen. Eine genauere Betrachtung dieser und weiterer Fehlerquellen erfolgt in Kapitel 5.3.

Weiterhin ist zu erkennen, dass die Lambdagradienten der mageren Betriebspunkte im betrachteten Kurbelwinkelintervall im Vergleich zu den fetteren Betriebspunkten größer sind. In Abbildung 5.32 ist eine Saugrohrdruckvariation dargestellt. Auch hier staffeln sich die Verläufe gemäß ihrer globalen Lambdawerte, allerdings liegen die Kurven im Bereich von 255°KW näher bei einander. Die Variation von Lambda über den Saugrohrdruck scheint hier im Vergleich zu der Variation über die Einspritzmenge in Abbildung 5.31 einen geringeren Einfluss auf den Verlauf der Gemischbildung zu haben.

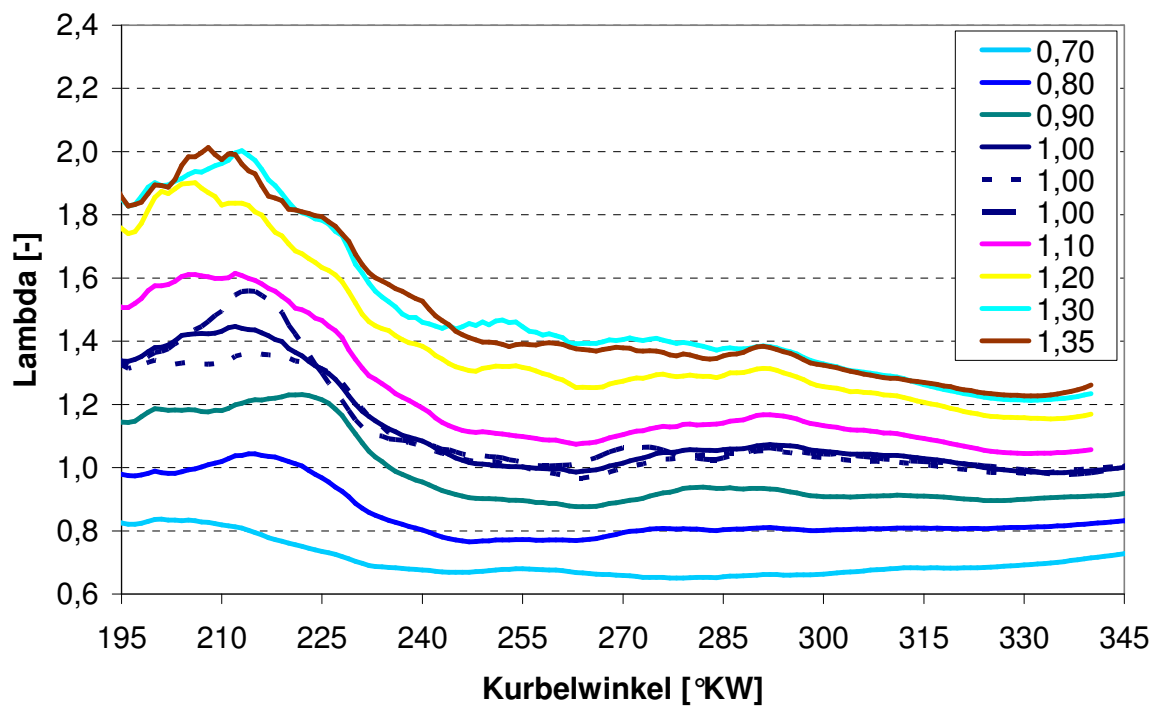


Abbildung 5.31: Einspritzmengenvariation mit geschlossener Ladungsbewegungsklappe, ge-
feuerter Homogenbetrieb, Mittelwerte aus je 100 Zyklen

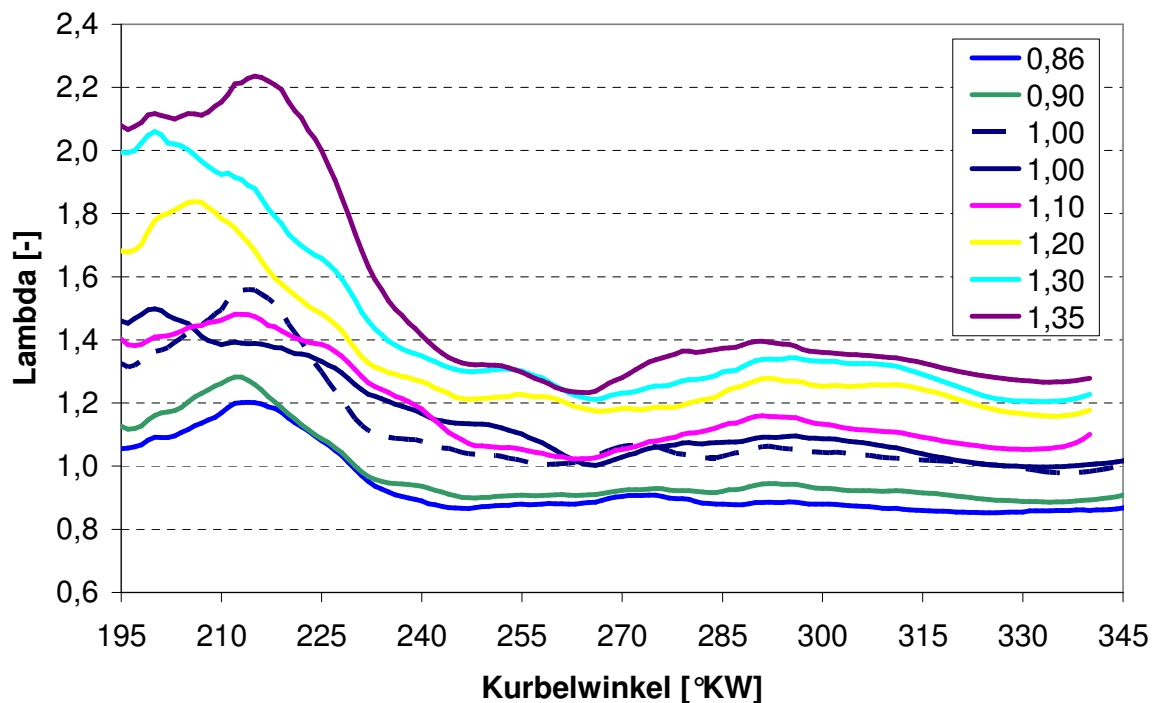


Abbildung 5.32: Saugrohrdruckvariation mit geschlossener Ladungsbewegungsklappe. Ge-
feuerter Homogenbetrieb, Mittelwerte aus je 100 Zyklen

Die Abbildung 5.33 zeigt ebenso eine Variation von Lambda durch eine Veränderung der eingespritzten Kraftstoffmenge, allerdings ist die Ladungsbewegungsklappe in diesem Fall geöffnet, so dass aus den niedrigeren Geschwindigkeiten der Luft beim Einströmen in den Zylinder eine geringere Tumbleströmung und eine deutlich schwächer ausgeprägte Ladungsbewegung resultieren. Dies führt in diesem Fall dazu, dass die kraftstoffreichen Gemischanteile erst sehr spät in der Kompression in den Bereich des Brennraumdachs, wo sich die Zündkerze befindet, transportiert werden.

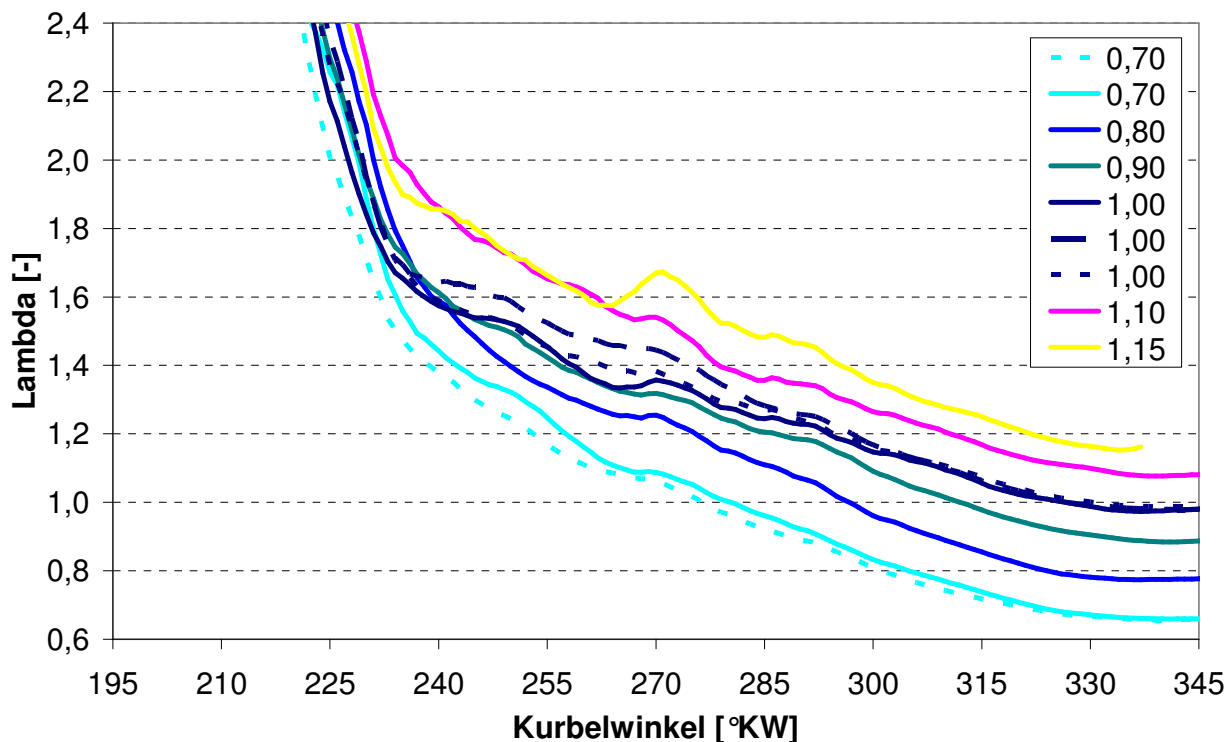


Abbildung 5.33: Einspritzmengenvariation mit geöffneter Ladungsbewegungsklappe, gefeuerter Homogenbetrieb, Mittelwerte aus je 100 Zyklen

Die Messungen stimmen mit den motorischen Ergebnissen überein, da eine weitere Abmagerung des Gemisches auf ein ähnliches Niveau wie bei den Betriebspunkten mit geschlossener LBK aufgrund von Verbrennungsaussetzern nicht möglich ist. Auch eine Frühverschiebung des Zündzeitpunkts, um der trägeren Entflammung bei mageren Gemischen Rechnung zu tragen, ist hier nicht hilfreich, da der Lambdawert in diesem Bereich einen starken Gradienten aufweist und die Zündbedingungen sich mit früherem Zündzeitpunkt noch stärker verschlechtern.

In Abbildung 5.34 ist die Standardabweichung von Lambda zum Zündzeitpunkt in Abhängigkeit von Lambda für die bereits vorgestellten Parametervariationen aus Abbildung 5.31, Abbildung 5.32 und Abbildung 5.33 dargestellt. Aus der Darstellung geht hervor, dass aufgrund der geringeren Ladungsbewegung die Schwankungen von Lambda zum Zündzeitpunkt bei geöffneter LBK (grüne Kreise) ca. doppelt so groß sind wie bei geschlossener LBK (rote und blaue Quadrate). Ein Vergleich der beiden Messreihen mit geschlossener LBK und konstanter Einspritzmenge

bzw. konstantem Saugrohrdruck zeigt, dass im Bereich um Lambda eins nur sehr geringe Abweichungen auftreten. Im Bereich der mageren Zündgrenze ist die Streuung von Lambda bei Variation von t_i deutlich größer als bei Veränderung des Saugrohrdrucks. Im Bereich der fetten Zündgrenze kehrt sich das Verhalten um.

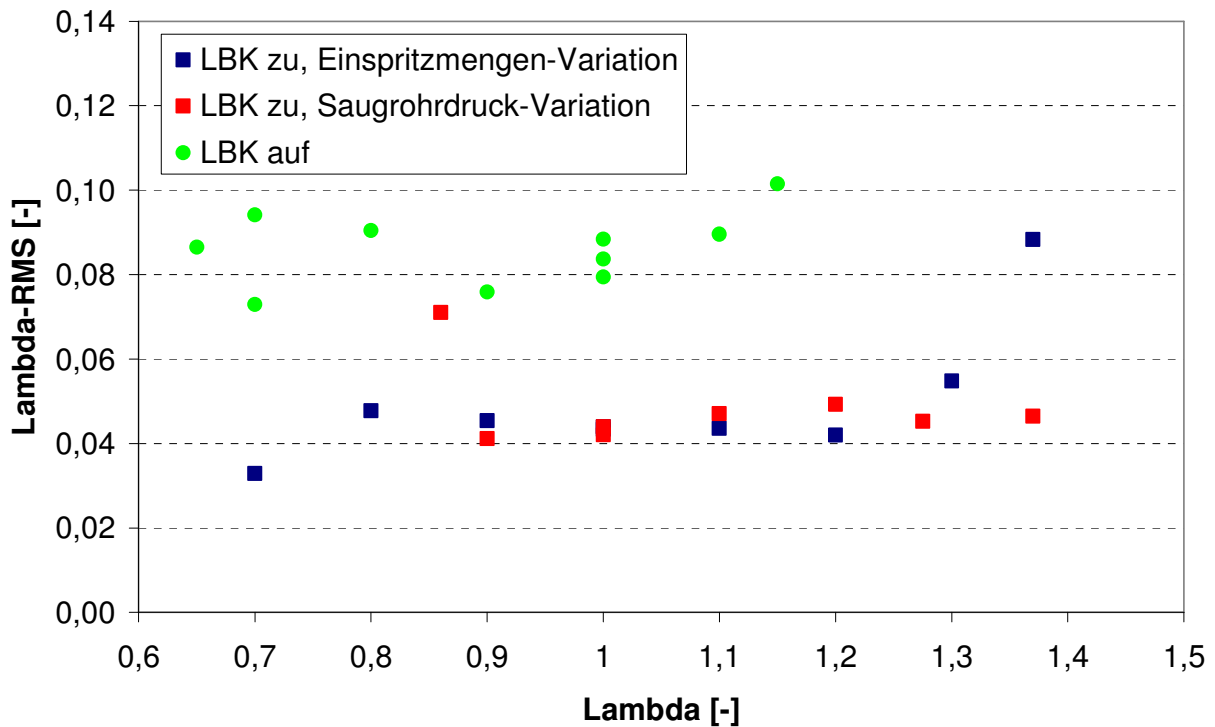


Abbildung 5.34: Standardabweichung von Lambda zum Zündzeitpunkt, Lambdavarisation

Aus dem Vergleich der Mitteldrücke der jeweiligen Betriebspunkte in Abbildung 5.35 geht hervor, dass die Ursache für die Unterschiede in der Lastpunktverschiebung liegt. Im Falle der Einspritzmengenvariation wird eine Abmagerung durch die Reduzierung der Einspritzmenge erreicht. Daraus resultiert ein stetiger Abfall des indizierten Mitteldrucks (p_{mi}) für die Betriebspunkte mit überstöchiometrischer Gemischzusammensetzung, so dass der Mitteldruck von ca. 3,5 bar bei Lambda 1,0 auf ca. 1 bar bei einem Lambda von 1,35 abfällt. Der entsprechende Betriebspunkt der Saugrohrdruckvariation wird durch das Erhöhen der Luftmenge im Brennraum bei konstanter Einspritzmenge eingestellt. Der Lastpunkt verschiebt sich nicht signifikant gegenüber dem Ausgangspunkt bei einem Lambda von 1,0. Betrachtet man die unterstöchiometrischen Betriebspunkte so kehrt sich das Verhalten um. Die Einspritzmengenvariation hat hier nur geringen Einfluss auf den indizierten Mitteldruck, während die fetten Punkte der Saugrohrdruckvariation deutlich niedrigere Mitteldrücke aufweisen. Daraus folgt, dass die Lambdaschwankungen zum Zündzeitpunkt an den Zündgrenzen stark lastabhängig sind.

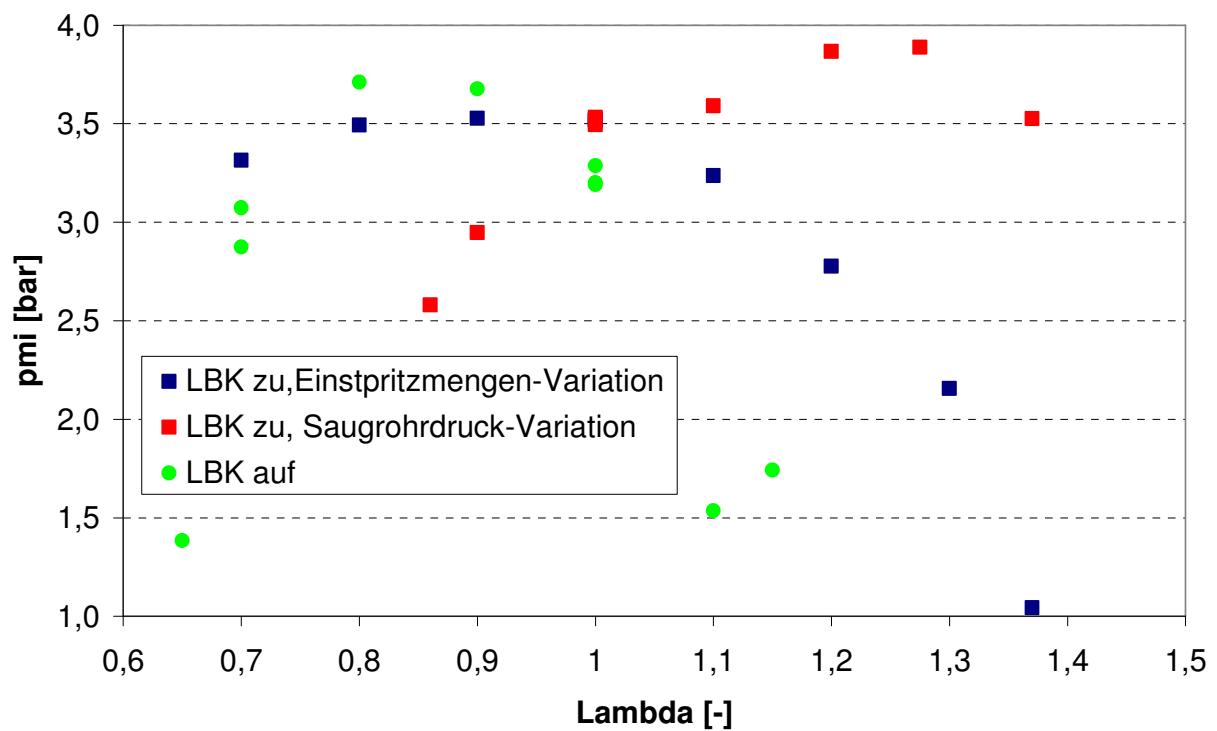
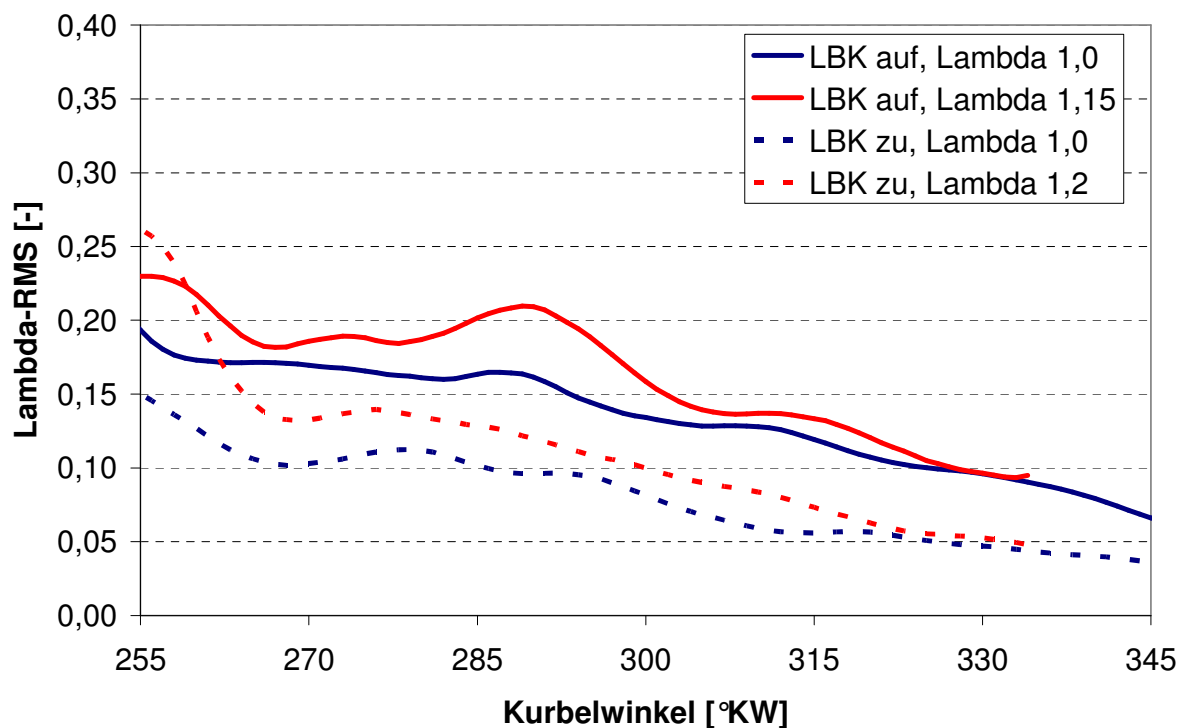
Abbildung 5.35: Mittlerer indizierter Mitteldruck (p_{mi}) verschiedener Lambdavariationen

Abbildung 5.36: Verlauf der Standardabweichung von Lambda über dem Kurbelwinkel

Die Standardabweichung von Lambda für 100 aufeinander folgende Zyklen ist in Abbildung 5.36 für den späten Teil der Kompressionsphase dargestellt. Die Betriebspunkte mit geschlossener LBK weisen durchgehend eine geringere Standardabweichung auf als die Punkte mit geöffneter LBK. Im Bereich des Zündzeitpunkts (320 °KW für LBK auf Lambda 1,15, 330 °KW für LBK zu Lambda 1,2, alle anderen 340 °KW,) ist die Standardabweichung für die Betriebspunkte mit geringer Ladungsbewegung etwa doppelt so groß wie im hier dargestellten Bestpunkt. Besonders im Fall des mageren Betriebspunktes bei geöffneter LBK schlägt sich dies in einem unrunder Motorlauf mit gelegentlichen Zündaussetzern nieder. Ein weiteres Vorziehen der Zündung ist nicht sinnvoll, da die Variation der Gemischbildung noch stärker ansteigt. Ein späterer Zündzeitpunkt ist aufgrund der trägen Verbrennungsreaktion motorisch nicht zielführend.

In Abbildung 5.37 ist eine zweidimensionale Häufigkeitsverteilung von 100 Einzelzyklen für einen Betriebspunkt mit hoher Ladungsbewegung und einem Lambda von 1,0 dargestellt. Alle Motorzyklen, deren Messwerte innerhalb eines Intervalls mit einer Breite von 0,25 bar Mitteldruck und 0,1 Lambdaeinheiten liegen, werden aufsummiert und gemäß der neben stehenden Farbskala dargestellt. Jedes Diagramm der Abbildung stellt eine Momentaufnahme zum jeweiligen Kurbelwinkel dar, der Zündzeitpunkt liegt bei 340 °KW.

Sowohl die Schwankungen von Lambda als auch die Schwankungen des Mitteldrucks fallen im hier gezeigten Betriebspunkt sehr gering aus. Weiterhin zeigt sich, dass die Gemischbildung in der hier dargestellten späten Kompressionsphase bereits abgeschlossen ist und sich die Häufigkeitsverteilung nicht mehr wesentlich verändert. Dieser Betriebspunkt kann daher als ein gutes Beispiel für eine stabile Gemischbildung betrachtet werden.

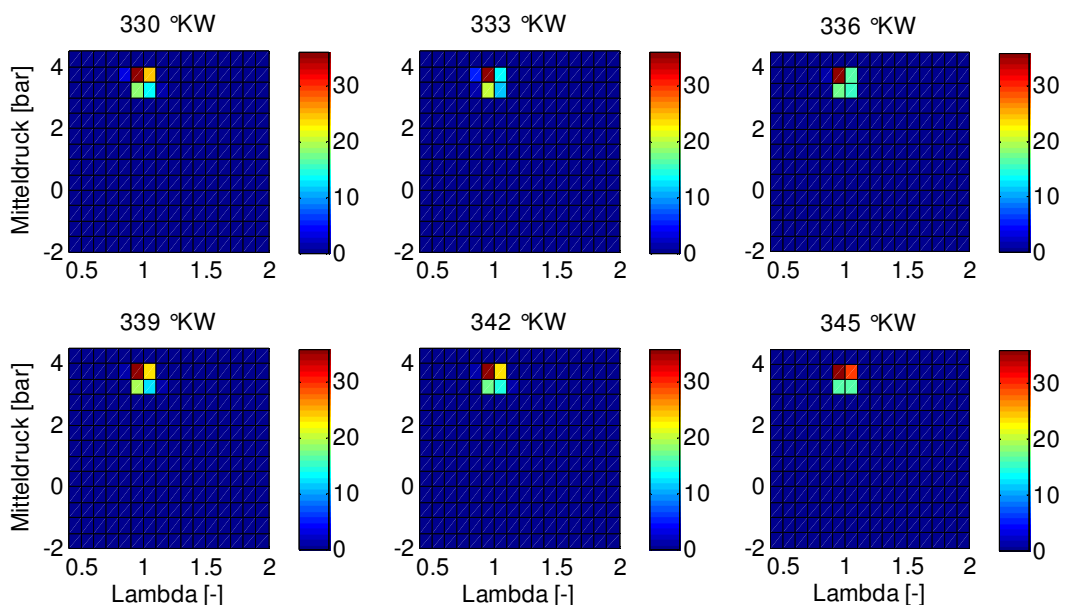


Abbildung 5.37: Lambda- / Mitteldruck-Häufigkeitsverteilung, LBK geschlossen, Lambda 1,0

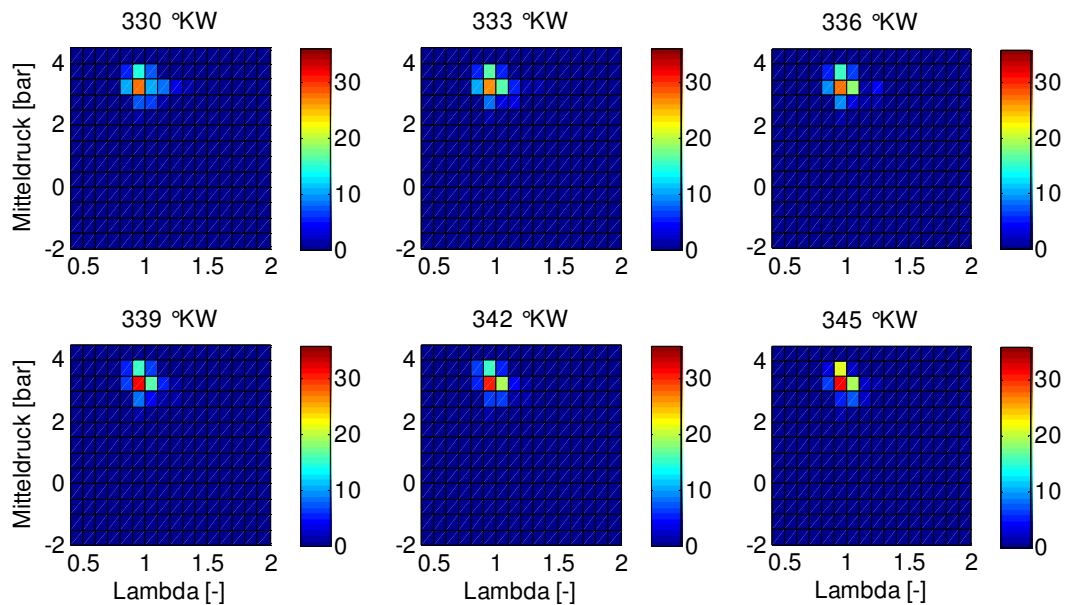


Abbildung 5.38: Lambda- / Mitteldruck-Häufigkeitsverteilung, LBK offen, Lambda 1,0

In Abbildung 5.38 ist eine Häufigkeitsverteilung für den gleichen Zeitraum für einen Betriebspunkt mit geringer Ladungsbewegung dargestellt. Im direkten Vergleich der Messreihen fällt auf, dass die Streuung der Einzelzyklen hier maßgeblich durch die Ladungsbewegung beeinflusst wird und stark zunimmt. Die Schwankungsbreite im betrachteten Zeitraum ist zu späteren Zeitpunkten hin geringer, was darauf hindeutet, dass die Gemischbildung noch nicht bzw. erst sehr spät abgeschlossen ist. Da der Mittelwert der Zyklen bei einem Lambda von 1,0 liegt, hat die größere Schwankungsbreite hier noch keinen großen Einfluss auf die gemessenen Mitteldrücke, da auch die stärksten Ausreißer noch innerhalb des motorischen Zündfensters liegen.

Die beiden folgenden Abbildungen vergleichen ebenfalls den Einfluss der Ladungsbewegung anhand zweier Messpunkte, allerdings bei einem mittleren Lambda von 1,2. Hier treten die Unterschiede deutlicher in Erscheinung als zuvor bei einem Lambda von 1,0. Während die Verteilung bei geschlossener LBK in Abbildung 5.39 weiterhin sehr kompakt ist und im dargestellten Zeitraum nicht wesentlich variiert, ist die Streuung der Lambdawerte bei geringer Ladungsbewegung (Abbildung 5.40) sehr viel größer¹⁷.

¹⁷ Der Umfang der Farbskala ist zur Verbesserung des Kontrasts des Bildes von 36 Stufen auf 18 halbiert.

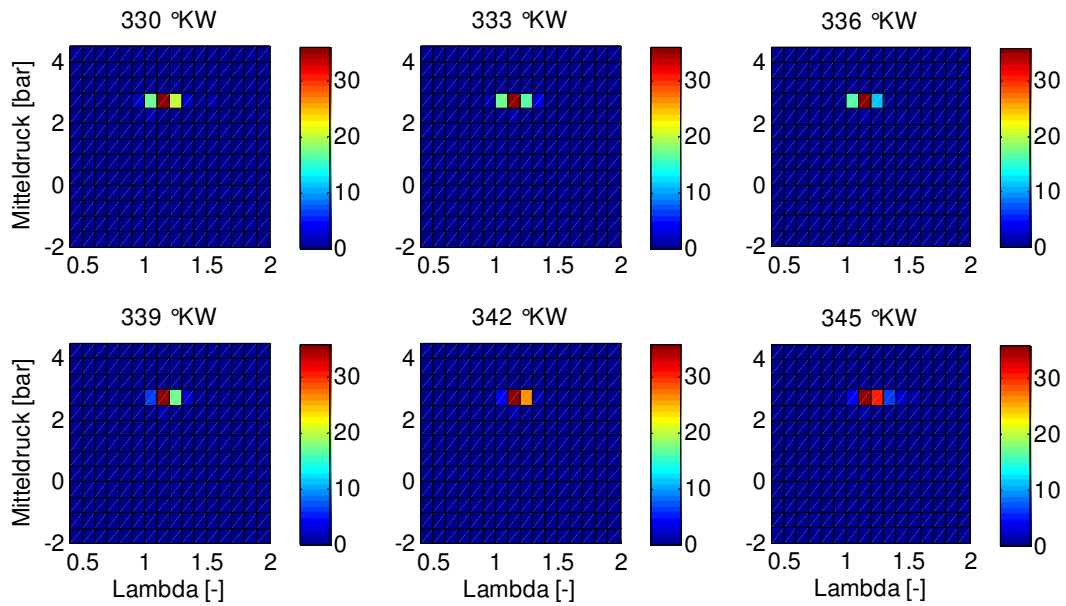


Abbildung 5.39: Lambda- / Mitteldruck-Häufigkeitsverteilung, LBK geschlossen, Lambda 1,2

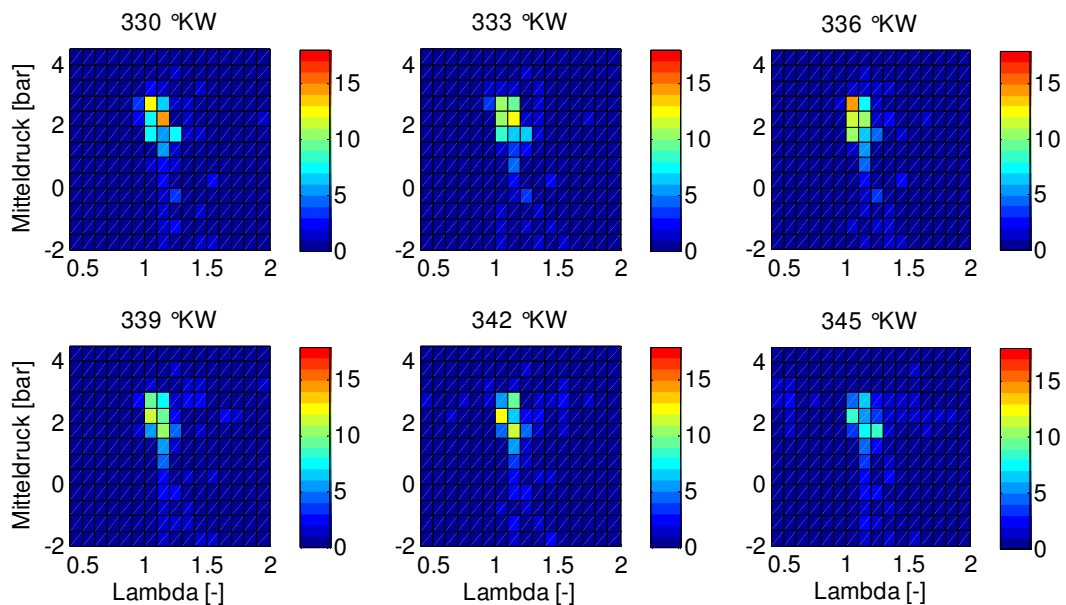


Abbildung 5.40: Lambda- / Mitteldruck-Häufigkeitsverteilung, LBK offen, Lambda 1,2

Man erkennt ebenfalls eine deutliche Zunahme der Schwankung des Mitteldrucks, die bereits zu Zündaussetzern oder Zyklen mit stark verschleppter und unvollständiger Verbrennung führt, während der Betriebspunkt mit starker Ladungsbewegung genauso stabil brennt wie bei einem Lambda von 1,0.

Auch wenn bei geringer Ladungsbewegung ein Trend zu erkennen ist, dass die besonders mageren Zyklen mit niedrigen Mitteldrücken einhergehen, so kann dennoch keine eindeutige Zuordnung zwischen dem Lambda zum Zündzeitpunkt und der Zündfähigkeit des Gemisch bzw.

erfolgreicher Verbrennung hergestellt werden. Dies liegt zum einen daran, dass die Position der Zündelektrode und das Messvolumen räumlich nicht identisch sind und zum anderen daran, dass die Position des Zündfunken in Bezug zur Elektrodenspitze räumlich und zeitlich variiert. Weiterhin ist das Gemisch im Brennraum nicht ideal homogen verteilt, so dass die räumlichen Schwankungen der Gemischkonzentration insbesondere im Bereich der Zündgrenzen ebenfalls einen Einfluss auf den Verbrennungsverlauf ausüben, der durch den Sensor nicht detektiert werden kann.

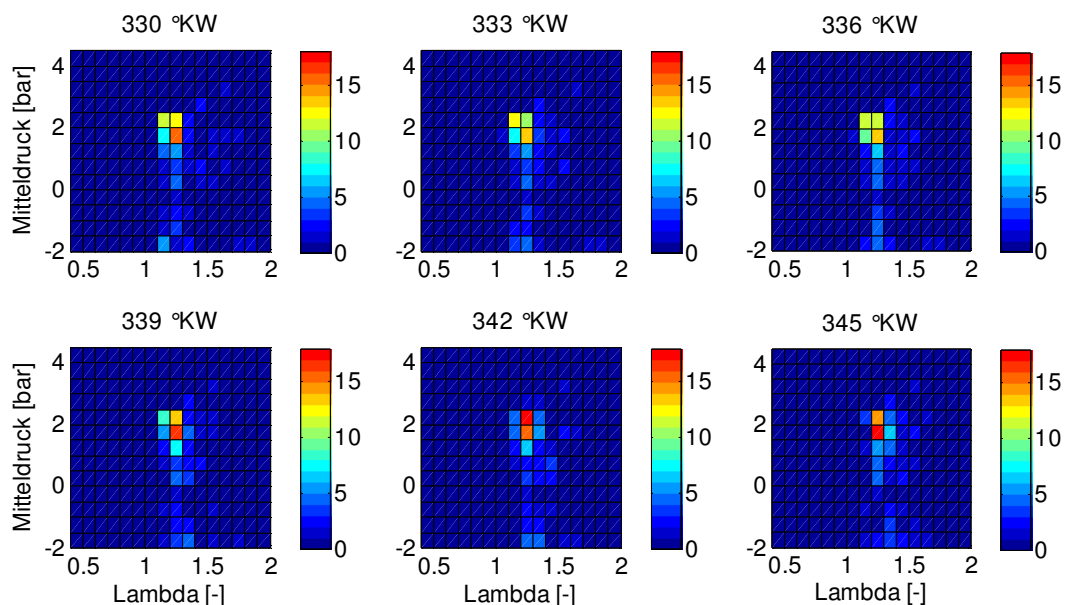


Abbildung 5.41: Lambda- / Mitteldruck-Häufigkeitsverteilung, LBK geschlossen, Lambda 1,4

In Abbildung 5.41 ist die Häufigkeitsverteilung bei starker Ladungsbewegung und einem mittleren Lambda von 1,4 aufgetragen. Hier zeigt sich ein ähnliches Verhalten wie bei einem Lambda von 1,2 bei geringer Ladungsbewegung. Die Kompaktheit der Verteilung bricht auf und franst zu mageren Gemischkonzentrationen hin aus. Weiterhin verdichtet sich die Verteilungswolke zu späten Kurbelwinkeln noch geringfügig. Auch hier ist ein Trend zu geringeren Mitteldrücken bei magerer Gemischzusammensetzung zu erkennen, allerdings ist aus den bereits genannten Gründen ebenfalls keine eindeutige Zuordnung zwischen dem Lambda zum Zündzeitpunkt und der anschließenden Zündfähigkeit herzustellen.

In den beiden folgenden Histogrammen (Abbildung 5.42, Abbildung 5.43) sind jeweils eine Serie von Messpunkten mit geschlossener und geöffneter Ladungsbewegungsklappe zum Zündzeitpunkt dargestellt. Der Lambdawert wird durch eine Variation des Saugrohrdrucks bei konstanter Einspritzmenge eingestellt. Bei geschlossener Ladungsbewegungsklappe profitiert die Gemischbildung von der hohen Strömungsgeschwindigkeit und der starken Turbulenz der einströmenden Frischluft. Das Resultat ist eine über den gesamten Lambdabereich homogene Verteilung des Gemisches bei nur sehr geringer Variation zwischen den einzelnen Zyklen. Vergleicht man das letzte Teilbild mit einem Lambda von 1,4 aus Abbildung 5.42 mit der kurbelwinkelauflösten Darstellung des vergleichbaren Betriebspunkts mit variierten Einspritzmengen aus

Abbildung 5.41, so fällt auf, dass die zyklischen Schwankungen im Fall der Saugrohrdruck-Variation deutlich geringer ausfallen. Wie bereits beim Vergleich der mittleren Lambdakurven angeführt wurde, ist die Ursache hierfür die Lastpunktverschiebung, die bei einer Abmagerung über den Saugrohrdruck deutlich geringer ausfällt als bei einer Verkürzung der Einspritzdauer (siehe Abbildung 5.35).

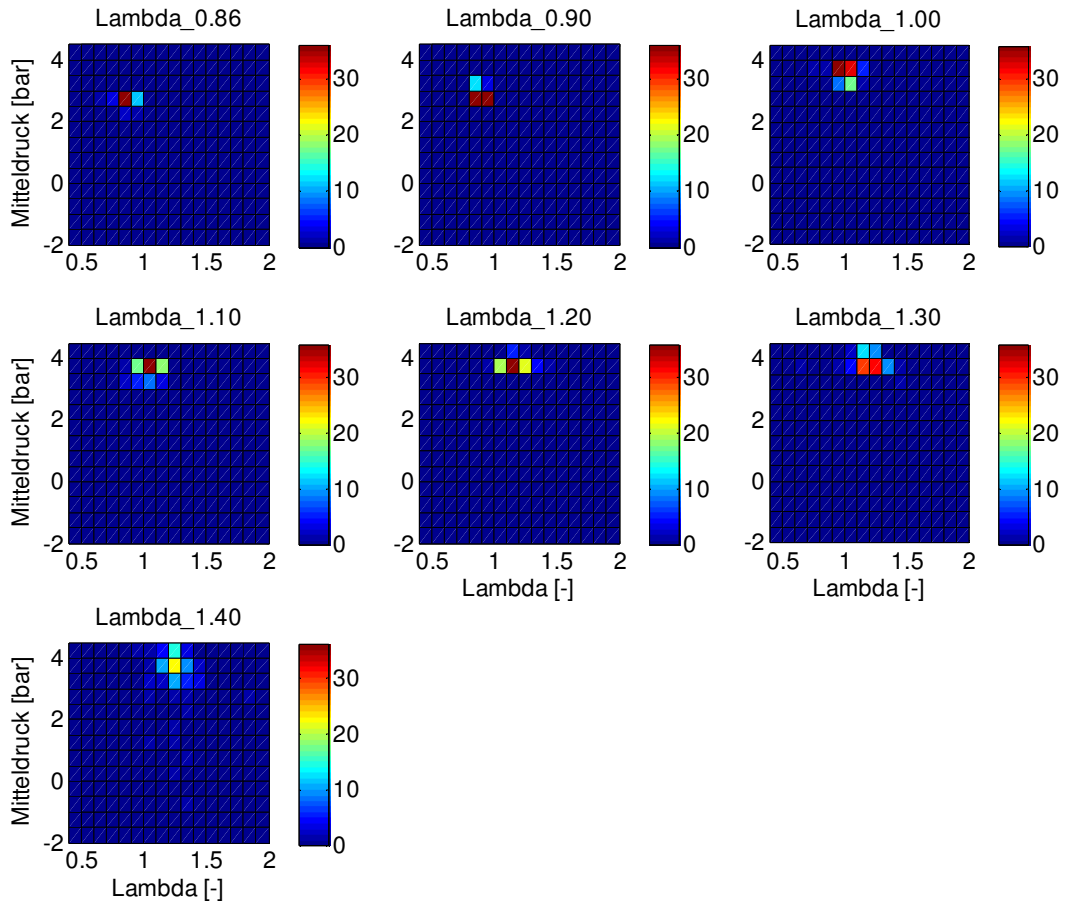


Abbildung 5.42: Lambda- / Mitteldruck-Häufigkeitsverteilung, LBK geschlossen, p_{sau} -Variation

Bei geöffneter Ladungsbewegungsklappe und den entsprechenden niedrigeren Strömungsgeschwindigkeiten im Ansaugkanal fällt die Toleranz des Brennverhaltens gegenüber einer Lambdavarisation deutlich geringer aus. Bereits im Basispunkt bei einem Lambda von 1,0 sind die zyklischen Schwankungen von Lambda deutlich größer als bei den fetteren Betriebspunkten. Bei einem Lambda von 1,1 treten bereits vermehrt Verbrennungsaussetzer auf. Die Schwankungsbreite von Lambda ist in beiden Punkte ähnlich, allerdings führt die Verschiebung des Schwerpunkts der Verteilung in Richtung magerer Zündgrenze dazu, dass sich das Brennverhalten verschlechtert. Bei einem Lambda von 1,15 ist der Motorlauf bereits stark instabil, was zu einer Erhöhung der Schwankungsbreite führt.

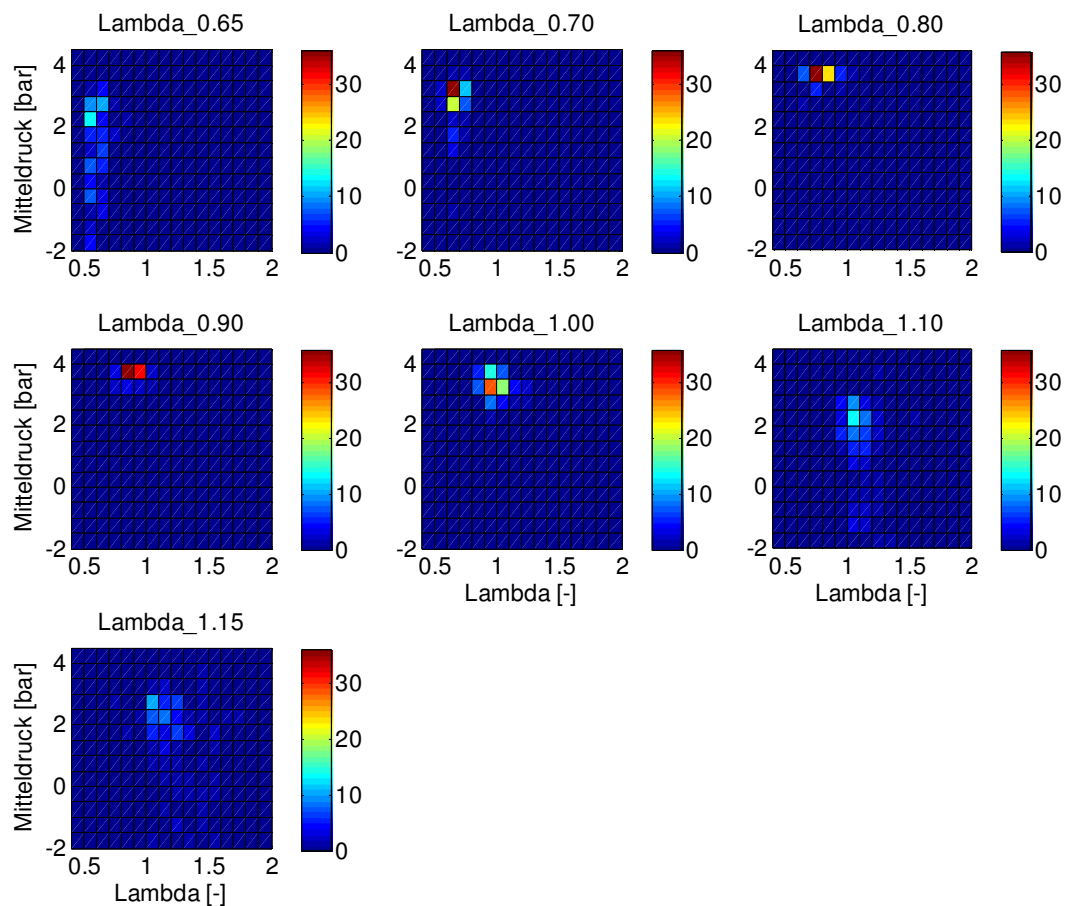


Abbildung 5.43: Lambda- / Mitteldruck-Häufigkeitsverteilung, LBK offen, p_{sau} -Variation, gefeuert

5.2.6 Schichtbetrieb (FSI)

Das Verfahren zur Bestimmung des Lambdawertes im Homogenbetrieb ist ebenfalls für Messungen im Schichtbetrieb geeignet. Da der Kraftstoff hierbei erst sehr spät in der Kompressionsphase in den Brennraum eingespritzt wird, erfolgt die Bestimmung der Bezugsintensität abweichend von den Messungen im Homogenbetrieb nicht nach Abschluss der Verbrennung während der Ausschubphase, sondern im unteren Totpunkt nach Beendigung des Ansaugtaktes. Während die Einspritzung im Homogenbetrieb bereits früh in der Ansaugphase erfolgt, wird der Zeitpunkt im Schichtbetrieb spät in die Kompressionsphase verschoben mit dem Ziel der Erzeugung eines lokal zündfähigen Gemisches bei global hohem Luftüberschuss. Das bedeutet, dass zum Zeitpunkt der Bestimmung der Referenzintensität ggf. nicht ausgespülter Restkraftstoff aus dem Vorgängerzyklus mit der angesaugten Frischluft verdünnt ist. Im Schichtbetrieb wird der Motor nahezu vollständig entdrosselt betrieben, so dass die Restkraftstoffkonzentration im

Brennraum zu diesem Zeitpunkt minimal ist. Im Vergleich zum Homogenbetrieb ist die Restkraftstoffkonzentration ca. um den Faktor sieben¹⁸ verdünnt, so dass der Einfluss hier vernachlässigt werden kann. Die übrigen Berechnungsschritte gleichen denen der Auswertung der Homogenbetriebspunkte. Es kommt die bereits in Abbildung 5.30 dargestellte Kalibrierfunktion zum Einsatz. Der Saugrohrdruck (900 mbar), die Einspritzdauer und der Zündzeitpunkt (330 °KW) sind für die nachfolgend dargestellten Schichtbetriebspunkte konstant. Lediglich der Einspritzzeitpunkt wird variiert.

Der späte Einspritzvorgang während der Kompression führt zu einer starken zeitlichen Variation des Luft-Kraftstoff-Verhältnisses an der Zündkerze, wie in Abbildung 5.44 dargestellt. Dort ist der Lambdaverlauf für eine Variation des Ansteuerendes ASE (in °KW) der Einspritzung bis zum Einsetzen der Verbrennung aufgetragen. Das globale Lambda beträgt hier etwa 2,7. Aufgrund der Abweichungen vom Serienkolben ist auch das lokale Lambda zum Zündzeitpunkt mager.

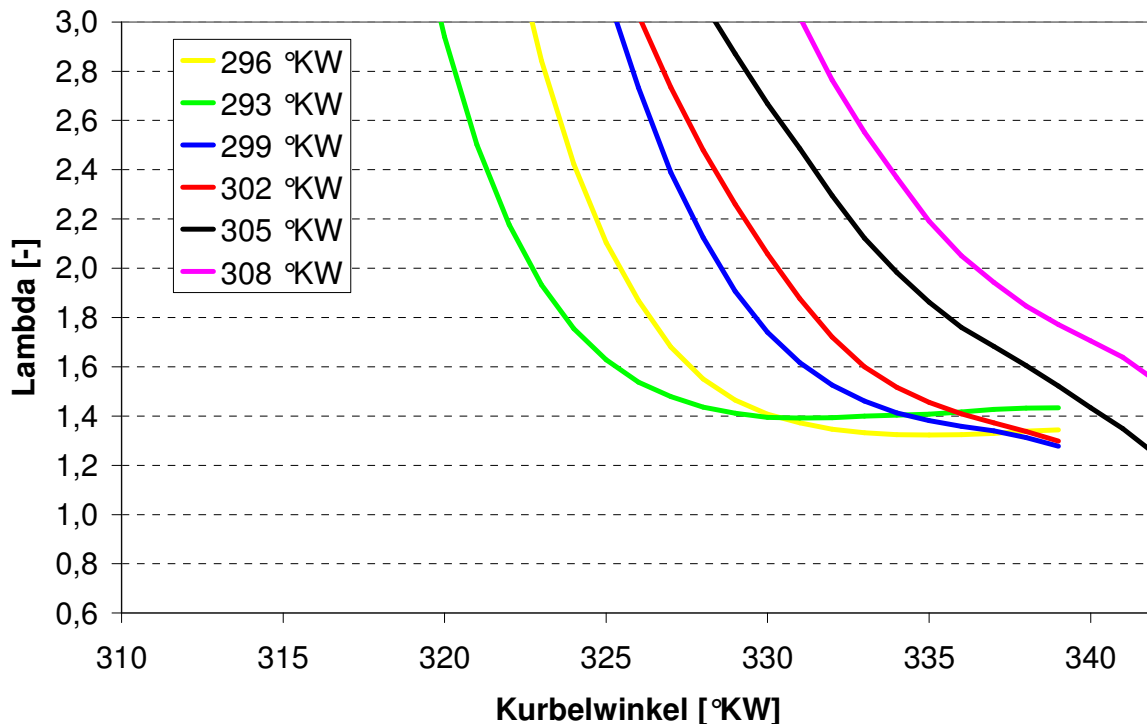


Abbildung 5.44: Ansteuerendevariation, Schichtbetrieb

Deutlich zu erkennen ist die zeitliche Abfolge der Flanken des Lambdaverlaufs, die mit dem ein-

¹⁸ Abschätzung auf Basis der zum Zeitpunkt der Bestimmung von I_0 herrschenden Drücke und Volumina im Brennraum. Die Restkraftstoffkonzentration zum Zeitpunkt spät in der Expansionsphase (Druck ca. 1,3 bar, Kompressionsvolumen des Motors) wird verdünnt mit der angesaugten Frischluftmenge (Druck ca. 0,9 bar, Hubvolumen einschließlich Kompressionsvolumen).

gestellten Ansteuerende korrelieren. Bei Betrachtung der Verläufe mit besonders früher Einspritzung und einem ASE von 293 °KW bzw. 296 °KW weist der Lambdawert noch vor dem Zündzeitpunkt (330 °KW) ein lokales Minimum auf und magert anschließend wieder ab, während das Gemisch bei späterer Einspritzung (ASE 299 °KW bzw. 302 °KW) zu diesem Zeitpunkt noch fetter wird. Verschiebt man die Einspritzung noch weiter in Richtung des oberen Totpunkts, so wird das Gemisch an der Messstrecke zwar stetig fetter, allerdings ist das Gemisch zum Zündzeitpunkt noch sehr mager und erreicht erst kurz nach dem Zündzeitpunkt einen Lambdawert kleiner als 1,4, der sich im direkteinspritzenden Homogenbetrieb als magere Zündgrenze herausgestellt hat. Da der Zündfunken ca. 1 ms (entspricht 12 °KW bei 2000 min⁻¹) anhält, ist auch im Fall der Einspritzung bei 305 °KW noch von einer sicheren Entflammung auszugehen. Im Falle einer noch späteren Einspritzung ist jedoch mit einer erhöhten Aussetzerrate zu rechnen wie auch bei der besonders frühen Einspritzung, da hier im Lambdaverlauf kein Trend zum weiteren Anfetten zu erkennen ist.

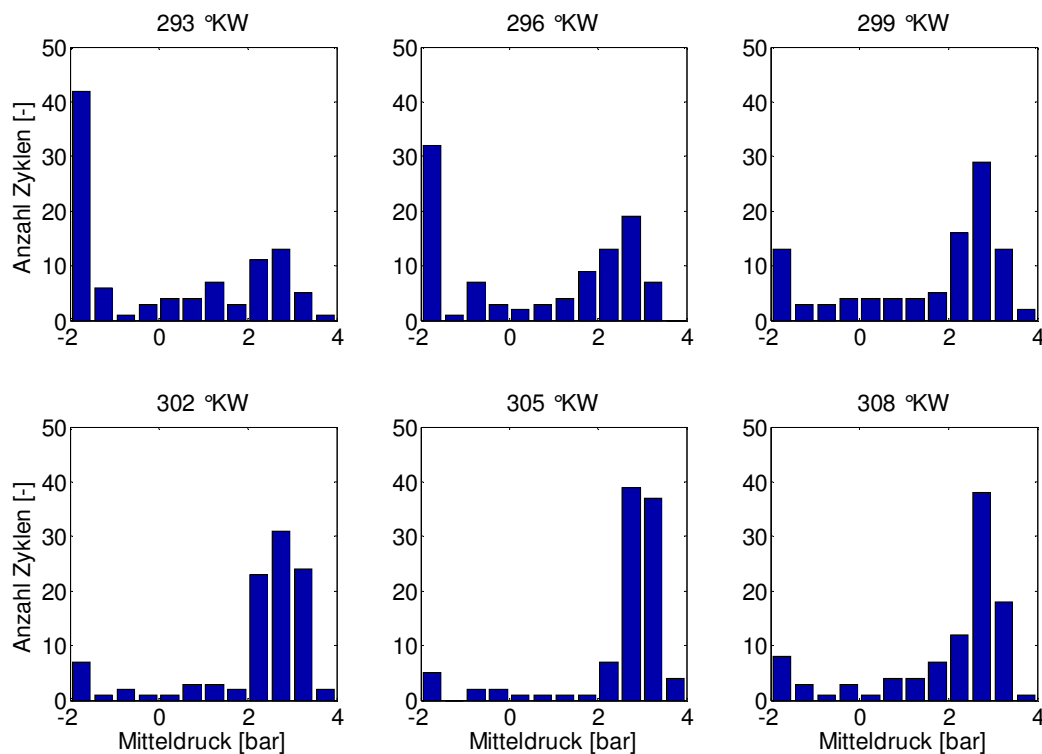


Abbildung 5.45: Häufigkeitsverteilung Mitteldruck, ASE-Variation

Das Ergebnis der Auswertung der Zylinderdruckindizierung der entsprechenden Betriebspunkte deckt sich mit der Analyse der mittleren Lambdaverläufe. In Abbildung 5.45 sind die Häufigkeitsverteilungen des Mitteldrucks aufgetragen. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Aussetzerra-

ten¹⁹ bei sehr früher Einspritzung aus den oben bereits genannten Gründen sehr hoch sind. Mit späterem Einspritzzeitpunkt nimmt die Verbrennungsstabilität weiter zu, bis Sie bei einem Einspritzzeitpunkt zwischen 302 °KW und 305 °KW ein Maximum erreicht. Anschließend verschlechtert sich das Brennverhalten wieder. Grundsätzlich fällt auf, dass auch die Bestpunkte noch signifikante Aussetzerraten aufweisen. Dies ist auf die Besonderheiten des verwendeten Forschungsmotors zurückzuführen, der zwar geschichtet betrieben werden kann, dessen Kolben- und Ansaugkanalgeometrie jedoch nicht den aus Serienmotoren bekannten Abstimmungsprozess für ein auf Stabilität optimiertes Brennverfahren durchlaufen haben.

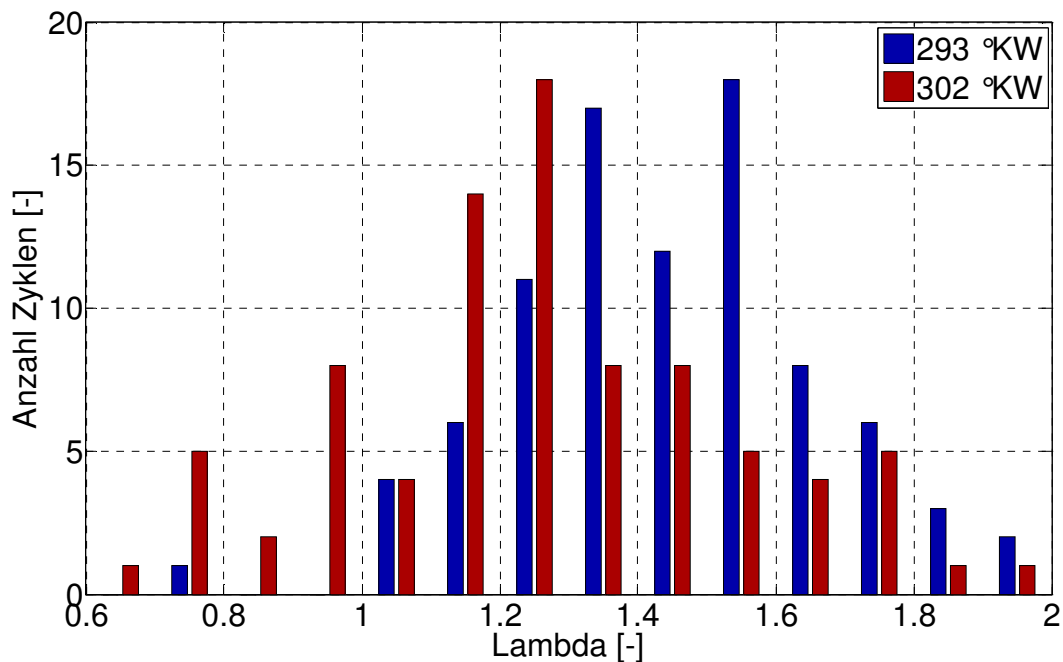


Abbildung 5.46: Häufigkeitsverteilung der Lambdawerte zum Zündzeitpunkt

Die Abbildung 5.46 zeigt die Häufigkeitsverteilung des Lambdawertes zum Zündzeitpunkt für ein frühes und ein spätes ASE. Der Vergleich zeigt, dass die Gemischzusammensetzung eines Großteils der Zyklen im Falle der frühen Einspritzung außerhalb der Zündgrenzen liegt. Dies deckt sich mit den bereits beschriebenen Ergebnissen aus der Auswertung der parallel gemessenen Zylinderdruckverläufe.

¹⁹ Verbrennungsaussetzer werden als negative Mitteldrücke detektiert

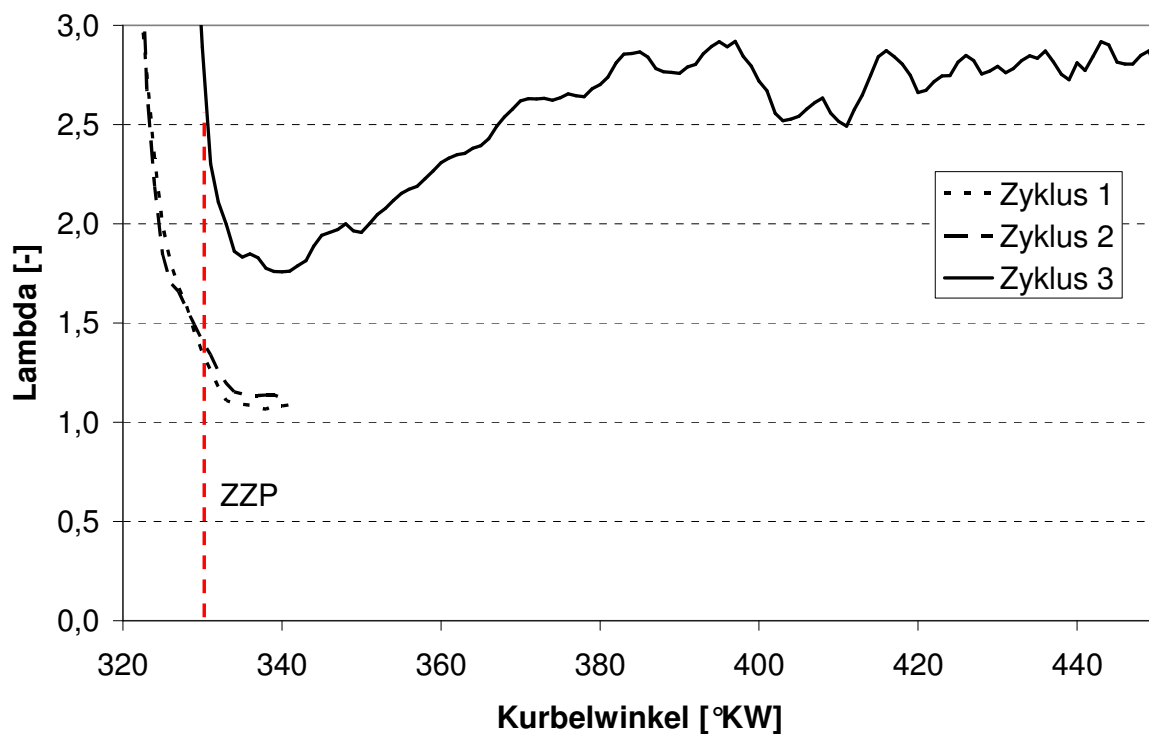


Abbildung 5.47: Lambdaverlauf im Schichtbetrieb, Einzelzyklen

In Abbildung 5.47 sind die Lambdaverläufe für drei Einzelzyklen dargestellt. Während das Gemisch in Zyklus 1 und 2 verbrennt, kommt es in Zyklus 3 zu einem Aussetzen der Verbrennung. Zum Zündzeitpunkt von 330°KW (gestrichelte Linie) ist das Gemisch an der Zündkerze zu mager für eine Entflammung. Im weiteren zeitlichen Verlauf löst sich die lokal fette Gemischwolke auf und der Kraftstoff durchmischt sich mit der umgebenden Luft im Brennraum. Ab ca. 370°KW ist das Gemisch auf den Wert des globalen Lambdas von 2,7 abgemagert.

Im Rahmen der Diskussion der Ergebnisse aus den Versuchen im Homogenbetrieb ist bereits der Einfluss der räumlichen Abweichung von Zündelektrode und Messvolumen diskutiert worden. Dies gilt ebenso für die Interpretation der Messwerte im Schichtbetrieb. Aufgrund der ausgeprägten Lambdagradienten an den Rändern der lokal fetten Gemischwolke im Brennraum ist es nicht möglich, eine eindeutige Zuordnung zwischen dem Lambdawert zum Zündzeitpunkt und der anschließenden Verbrennung herzustellen. Zwar trifft dies in einigen Fällen (siehe Abbildung 5.47) zu, allerdings zeigt die nachfolgend dargestellte Häufigkeitsverteilung in Abbildung 5.48, dass trotz einer Häufung von Zündaussetzern im Falle von Lambdawerten größer als 1,4 insbesondere bei einem Ansteuerende von 302°KW auch Messzyklen aufgezeichnet wurden, bei denen trotz sehr magerer Gemischzusammensetzungen zum Zündzeitpunkt keinerlei negativer Einfluss auf den Verbrennungsverlauf festgestellt werden kann. Weiterhin weisen einige Zyklen bei frühem Ansteuerende (293°KW) trotz eines Lambdawerts innerhalb der Zündgrenzen Verbrennungsaussetzer auf.

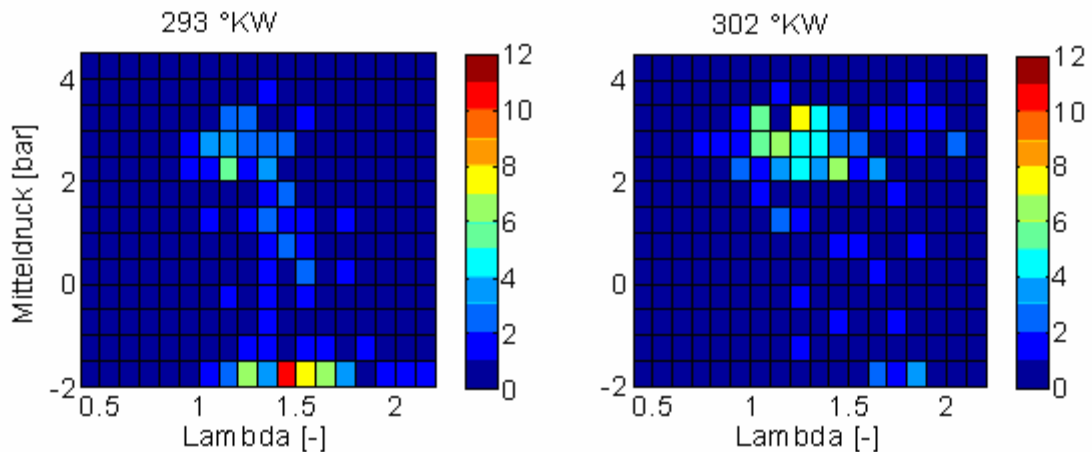


Abbildung 5.48: Lambda- / Mitteldruck-Häufigkeitsverteilung, Schichtbetrieb, ASE-Variation

5.2.7 Homogenbetrieb mit Saugrohreinjection (MPI²⁰)

Wie bereits in Kapitel 5.2.2 beschrieben wurde, kann der für die gefeuerten Untersuchungen verwendete Motor auch mit äußerer Gemischbildung betrieben werden. Hierzu werden die im Zylinderkopf befindlichen Einspritzventile durch Blindstopfen ersetzt und Niederdruckeinspritzdüsen im Ansaugkanal montiert. Die im direkteinspritzenden Motorbetrieb verwendete Hochdruckeinspritzpumpe mit Drücken um 75 bar wird ebenfalls ersetzt durch eine Kraftstoffpumpe mit Förderdrücken von ca. 5 bar. Die Dauer der Ansteuerung der Einspritzventile ist ca. fünf mal so lang wie bei interner Gemischbildung und erfolgt bereits vor der Ansaugphase, so dass die Mischung aus Kraftstoff und Luft bereits im Saugrohr bzw. im Einlasskanal beginnt. Die Ladungsbewegungsklappe (LBK) bleibt geöffnet.

²⁰ Multipoint-Injection, kurz MPI, ist ein verbreiteter englischer Begriff für Motoren mit externer Gemischbildung und Saugrohreinjection des Kraftstoffs. Im Gegensatz zur einfacheren Zentraleinspritzung mit nur einem Einspritzventil wird beim MPI-System jeder Zylinder individuell durch eine Einspritzdüse im Ansaugkanal mit Kraftstoff versorgt.

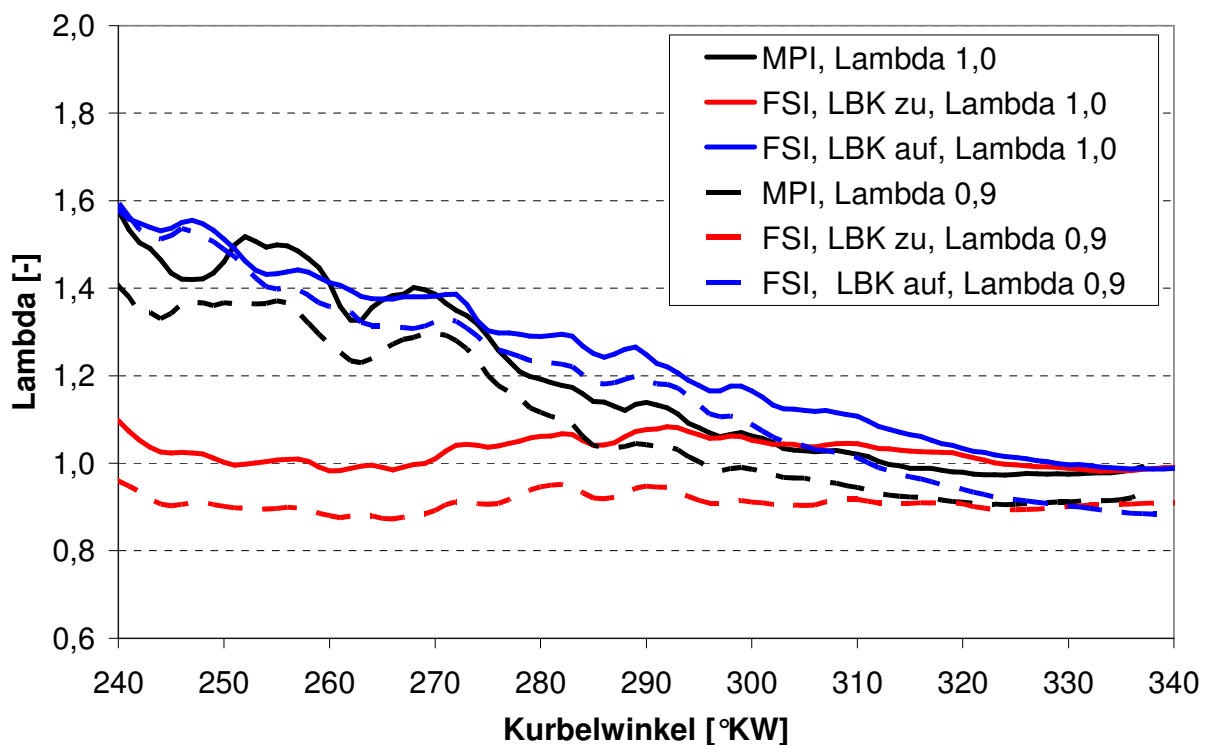


Abbildung 5.49: Gemittelter Lambdaverlauf, gefeuert, Vergleich MPI, FSI LBK offen, FSI LBK geschlossen

In Abbildung 5.49 sind die über 100 Zyklen gemittelten Lambdaverläufe von externer und interner Gemischbildung bei geöffneter und geschlossener Ladungsbewegungsklappe für zwei Betriebspunkte bei einem Lambda von 1,0 bzw. 0,9 gegenübergestellt. Wie bereits im vorhergehenden Kapitel beim Vergleich der beiden Betriebsarten mit interner Gemischbildung erläutert wurde, wirken sich die größeren Strömungsgeschwindigkeiten der einströmenden Luft bei geschlossener LBK positiv auf die Durchmischung und die frühzeitige Homogenisierung aus. Bei externer Gemischbildung ist der für die Homogenisierung zur Verfügung stehende Zeitraum aufgrund der frühen Einspritzung in das Saugrohr deutlich länger als bei direkter Einspritzung, allerdings steht diesem Vorteil die schlechtere Zerstäubung des Kraftstoffs aufgrund des geringeren Einspritzdruckniveaus und die geringeren Strömungsgeschwindigkeiten des Gemisches entgegen [7]. Weiterhin kommt es zu einer verstärkten Kraftstoffbenetzung der Oberflächen im Bereich der Saugrohrwände und des Ventiltellers. Betrachtet man den Lambdaverlauf bei externer Gemischbildung im Vergleich zu den Verläufen bei interner Gemischbildung, so ist festzustellen, dass ein nahezu stationärer Lambdawert etwa 20°KW früher erfolgt als bei geöffneter Ladungsbewegungsklappe. Die beste Homogenisierung wird jedoch bei Direkteinspritzung mit geschlossener LBK erreicht, was die Bedeutung einer kontrollierten Ladungsbewegung bei der Brennverfahrensentwicklung unterstreicht.

Betrachtet man die Auswertung der Einzelzyklen zum Zündzeitpunkt (und vergleicht die Häufigkeitsverteilung von Lambda und dem Mitteldruck der externen Gemischbildung in Abbildung 5.50 mit den entsprechenden Betriebspunkten bei interner Gemischbildung (Abbildung 5.37,

Abbildung 5.38), dann fällt auf, dass die Streuung sowohl von Lambda als auch des Mitteldrucks auf dem Niveau des Betriebspunktes bei geschlossener LBK liegt.

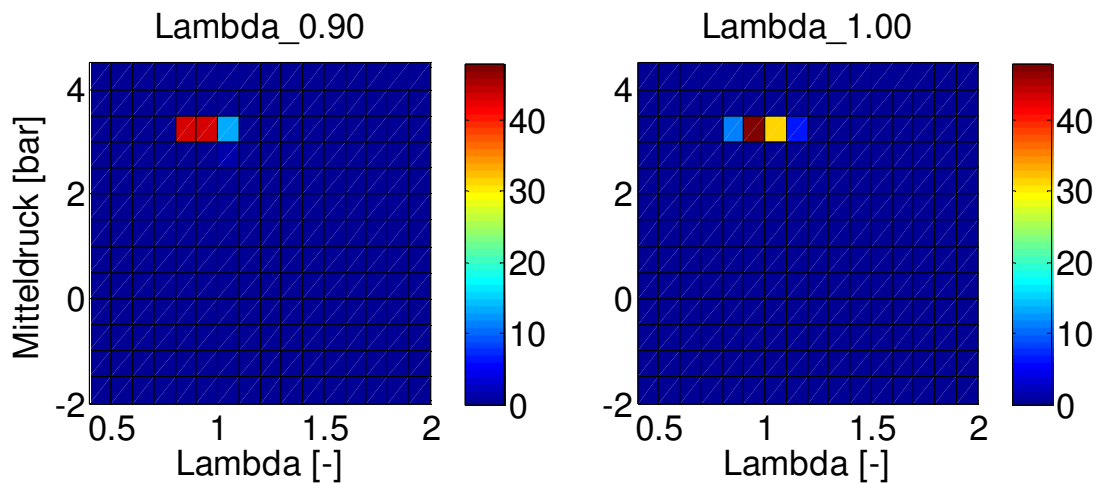


Abbildung 5.50: Lambda- / Mitteldruck-Häufigkeitsverteilung, externe Gemischbildung (MPI)

Sie fällt somit geringer aus als bei geöffneter LBK, obwohl die Mittelwerte zum Zündzeitpunkt (325°KW bzw. 340°KW) in Abbildung 5.49 keine signifikanten Unterschiede zwischen den Messungen im MPI- und FSI-Betrieb bei geöffneter LBK erkennen lassen. Die Analyse von Lambda im Einzelzyklus bzw. in Form von Häufigkeitsverteilungen ermöglicht somit die Darstellung von zyklischen Schwankungen der Gemischbildung und der zeitlichen Entwicklung der Gemischhomogenisierung, die mit herkömmlicher Lambdamesstechnik nicht erfasst werden können.

5.2.8 Homogenbetrieb 4-Zylinder FSI®-Serienmotor

Das Messsystem wurde weiterhin an einem 4-Zylinder-FSI®-Serienmotor erprobt, um die Übertragbarkeit der bereits vorgestellten Messdatenauswertung auf weitere Motoren und Kraftstoffe zu validieren. Die nachfolgende Tabelle 5.4 enthält die wesentlichen Motorparameter.

Hub	92,8 mm
Bohrung	82,5 mm
Verdichtung	9,9 : 1
Kraftstoff	Eurosuper

Tabelle 5.4: Motordaten, 4-Zylinder-FSI®-Serienmotor

Der verwendete Motor ist für den Homogenbetrieb ausgelegt und weist keinen zur Schichtladung geeigneten Kolben auf, daher beschränkt sich das Spektrum der Betriebspunkte auf den Homogenbetrieb. Der Lastbereich umfasst die untere und mittlere Teillast bis zu einem indizierten Mitteldruck von 6 bar.

Die Durchführung der Versuche und die Auswertung der Messdaten erfolgt analog zu der in Kapitel 5.2 vorgestellten Methode. Die Restkraftstoffkonzentration im Abgas ist durch die am Prüfstand vorhandene Abgasanalyse bekannt. Die Bestimmung der für die Umrechnung von Absorption in Lambda benötigten Kalibrierfunktion erfolgt wieder anhand einer Lambdavarisation über den Saugrohrdruck und die Einspritzmenge. In Abbildung 5.51 sind die entsprechenden Betriebspunkte und die ermittelte Näherungsfunktion im Vergleich zur Näherungsfunktion aus den vorhergehenden Versuchen mit Isooktan aufgetragen.

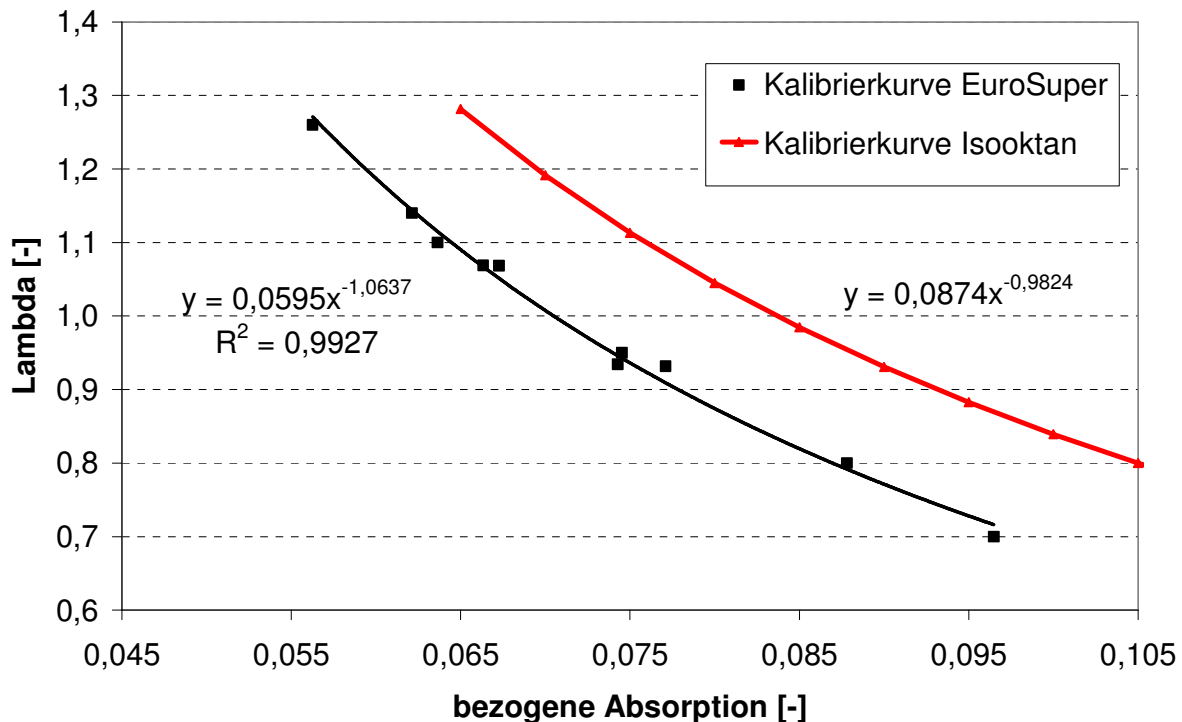


Abbildung 5.51: Vergleich der Kalibrierfunktionen von Isooktan und Realkraftstoff

Wie bereits in Kapitel 5.1.5 erläutert wurde, können die Punkte des Lambdascans durch eine Funktion vom Typ:

$$\lambda = m \cdot \alpha^p \quad (5.14)$$

angenähert werden. Der resultierende Verlauf der Näherungskurve bei Verwendung von Realkraftstoff unterscheidet sich vom Verlauf der Kalibrierfunktion bei Messungen mit Isooktan aufgrund der unterschiedlichen Absorptionsspektren und der daraus resultierenden „mittleren Absorptionskoeffizienten“ (siehe Kapitel 3.2.3). Bei qualitativ ähnlichem Verlauf ist die Kurve somit parallel verschoben.

In Abbildung 5.52 sind die Lambdaverläufe während der Kompression aufgetragen. Es ist festzustellen, dass die Gemischbildung besonders in der frühen Phase der Kompression deutlich weiter fortgeschritten ist, als dies bei den Messungen am Forschungsmotor in Kapitel 5.2.5 der Fall war. Die Gradienten fallen deutlich geringer aus, bzw. insbesondere bei einem Lambda von

0,98 tritt während des gesamten dargestellten Zeitraums kaum eine Veränderung des Lambda-wertes auf. Dieser Betriebspunkt entspricht nahezu dem Kennfeldpunkt des normalen Motorbetriebs mit einem Lambda von 1,0 und zeigt das Ergebnis einer optimierten Abstimmung des Brennverfahrens.

Einen weiteren Beleg für die Stabilität des Brennverfahrens liefert die Betrachtung der Häufigkeitsverteilung von Lambda und dem Mitteldruck zum Zündzeitpunkt in Abbildung 5.53. Die Lambdaverteilungen sind bis zu den Zündgrenzen sehr kompakt, was zu sehr geringen Schwankungen des indizierten Mitteldrucks führt. Weiterhin treten innerhalb der Zündgrenzen keinerlei Verbrennungsaussetzer auf.

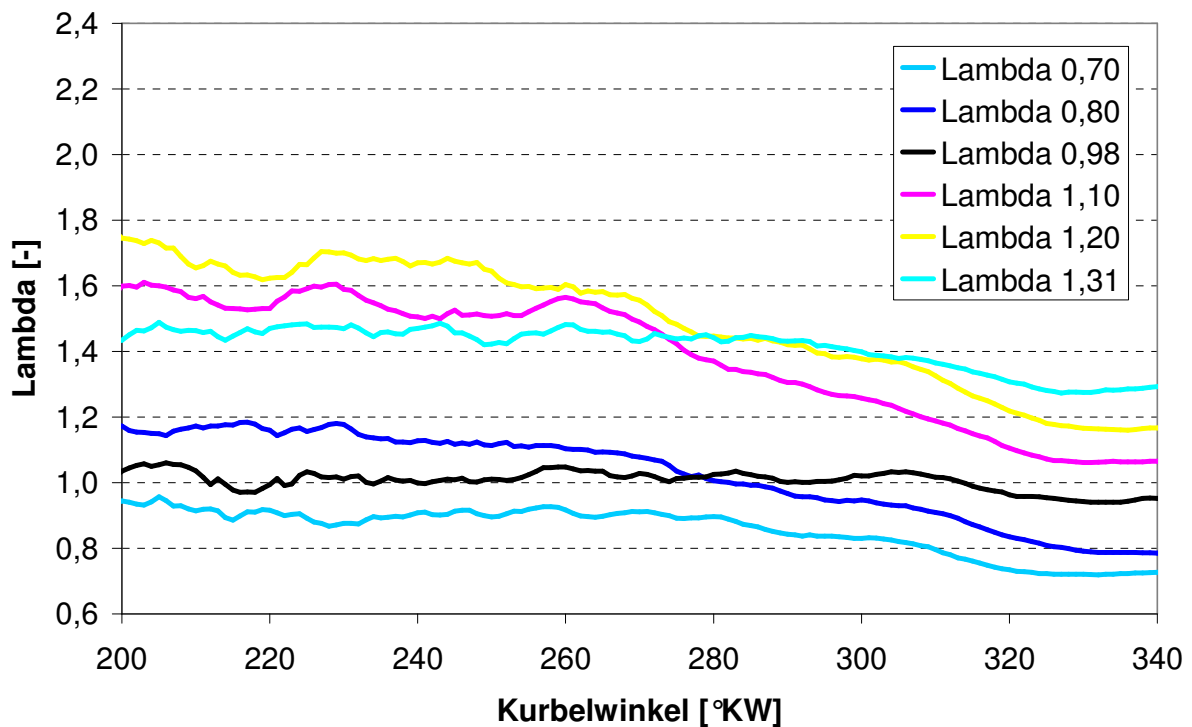


Abbildung 5.52: Lambdaverlauf, 4-Zylinder FSI®-Serienmotor

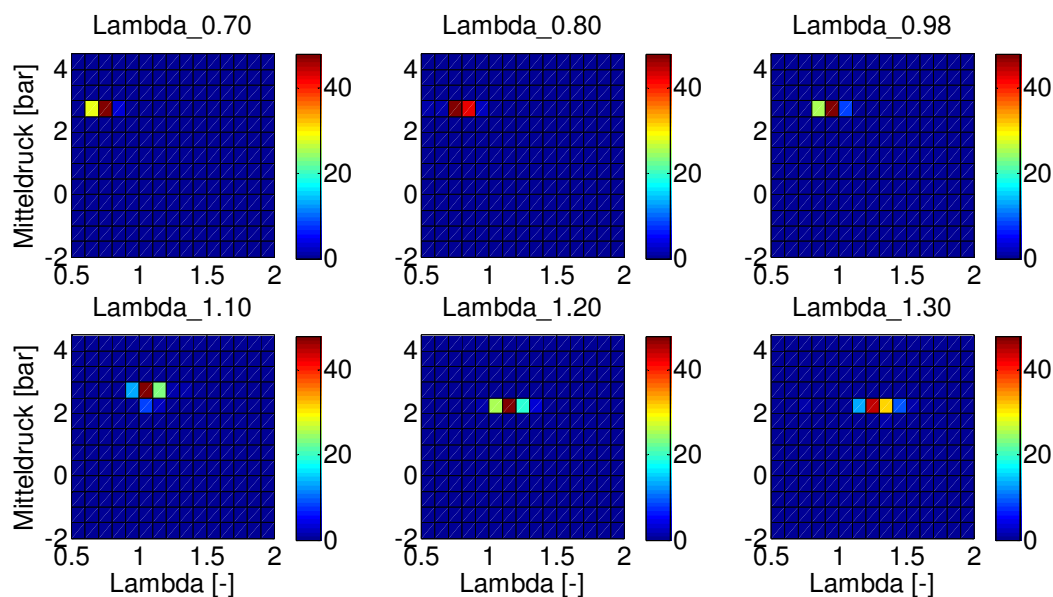


Abbildung 5.53: Lambda- / Mitteldruck-Häufigkeitsverteilung, 4-Zylinder FSI®-Serienmotor

Die Durchführung der Untersuchungen am Serienmotor hat gezeigt, dass sowohl die verwendete Hardware als auch die entwickelte Auswertestrategie geeignet sind, um die Gemischbildungsphänomene im Brennraum kurbelwinkelaufgelöst darzustellen. Vergleicht man den Messbetrieb mit Isooktan am Forschungsmotor und Eurosuper am Serienmotor, so bleibt festzustellen, dass der Spiegel beim Betrieb mit Standardkraftstoff schneller verschmutzt als beim Einsatz von Isooktan. Je nach Lastpunkt können ca. 3 bis 5 Betriebspunkte in Folge gemessen werden, bis der Sensor zu Reinigungszwecken ausgebaut werden muss. Hierbei reicht es die betroffenen Komponenten mit Aceton oder einem einfachen Scheuermittel zu reinigen. Weiterhin altert der Spiegel während des Testbetriebs insbesondere bei hohen Lasten bzw. Temperaturen und verliert seine Reflektivität. Dies ist wahrscheinlich auf Gefügeveränderungen an der Spiegeloberfläche zurückzuführen, da auch das Entfernen aller sichtbaren Rückstände nicht zur Wiederherstellung des Ausgangssignalniveaus führt.

5.3 Fehlerbetrachtung

Das Verfahren zur Bestimmung von Lambda anhand der mittels Brennraumsonden gewonnenen Absorptionmessungen unterliegt mehreren Einflüssen, die zu einem ungenauen Ergebnis führen können. Hierbei muss zwischen dem geschleppten und dem gefeuerten Motorbetrieb unterschieden werden. In den folgenden Abschnitten sind die einzelnen Fehlerquellen aufgeführt.

5.3.1 Fehlerquellen bei der Bestimmung der Absorption

Bei sehr geringen Kraftstoffkonzentrationen in der Messstrecke ist die Abschwächung des eingestrahlichten Lichts so gering, dass der Abfall der Detektorspannung im Signalausgang untergeht. Dieses Rauschen setzt sich zusammen aus dem elektronischen Rauschen des Verstärkersystems sowie dem thermischen Rauschen des Detektors und führt zu einem Fehler bei der Bestimmung der Absorption. Weiterhin wurde in Kapitel 5.2.4 erläutert, dass sich zum Zeitpunkt der Bestimmung der Bezugsintensität I_0 geringe Mengen Restkraftstoff in der Messstrecke be-

finden, so dass I_0 zu gering bestimmt wird. Dieser Umstand wird im gefeuerten Betrieb durch die Messung der Restkraftstoffkonzentration und einer Abschätzung der Restabsorption c_{rest} berücksichtigt. Im geschleppten Betrieb ist dies nicht möglich, da die Abgasanalyse in diesem Fall keine sinnvollen Werte liefert. Die Auswirkungen einer fehlerhaften Annahme der Restabsorption wie auch das Rauschen des Detektors auf die berechnete Absorption kann mittels einer Taylorreihe abgeschätzt werden.

$$korr.Absorption = f(I, c_{rest}) \quad (5.15)$$

$$\Delta korr.Abs = \frac{\partial korr.Abs.}{\partial I} \cdot \Delta I + \frac{\partial korr.Abs.}{\partial c_{rest}} \cdot \Delta c_{rest} \quad (5.16)$$

$\Delta Absorption$, ΔI und Δc_{rest} beschreiben jeweils den absoluten Fehler

Der relative Fehler der Absorption kann somit durch folgende Gleichung abgeschätzt werden:

$$\frac{\Delta korr.Abs.}{korr.Abs} = \frac{-f_v}{I} \cdot \Delta I + c_{rest} \quad (5.17)$$

f_v beschreibt den Volumenfaktor bei der Umrechnung der Absorption zur korrigierten Absorption.

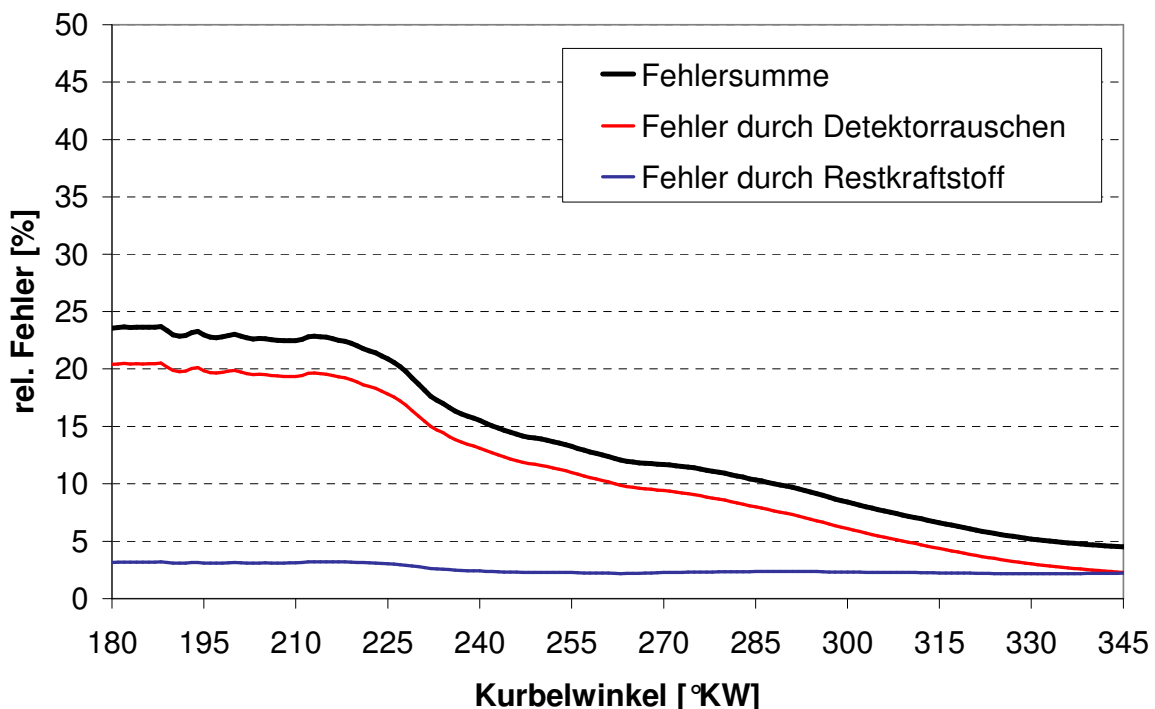


Abbildung 5.54: Fehlerabschätzung, relativer Fehler der korr. Absorption bei fehlerbehafteten Eingangsgrößen, $\Delta I = 15mV$, $\Delta c_{rest} = 0,0013$, Homogenbetrieb Lambda = 1,0

In Abbildung 5.54 ist der relative Fehler der korrigierten Absorption für einen Einzelzyklus im Homogenbetriebspunkt dargestellt. Daraus geht hervor, dass die Genauigkeit des Messsystems mit steigender Absorption zunimmt. Während der Fehler durch das Detektorrauschen stark vom absoluten Signalniveau abhängig ist und daher mit steigender Absorption geringer wird, ist der Fehler durch in der Messstrecke vorhandenen Restkraftstoff bei der Bestimmung der Referenzintensität im gesamten hier dargestellten Kurbelwinkelbereich deutlich geringer. Im Bereich des Zündzeitpunkts (340°KW) kann von einem Summenfehler von ca. $\pm 4,5\%$ ausgegangen werden. Außerhalb des hier dargestellten Bereichs kann der Fehler nicht quantifiziert werden. Während der Ansaugphase und in der Ausschubphase ist das Zylindervolumen nicht abgeschlossen, so dass das verwendete Verfahren zur Korrektur der Dichteänderung durch die Kolbenfunktion nicht angewendet werden kann. Wie bereits in Kapitel 5.2.4 erwähnt, können die Kurven der Lambdavarationen hier nur auf qualitativer Basis verglichen werden.

5.3.2 Genauigkeit der Referenzmessung

Zur Berechnung von Lambda aus der zur Kraftstoffkonzentration proportionalen Absorption ist eine Kalibrierung anhand bekannter Lambdawerte notwendig. Diese Bezugswerte stammen aus der Abgasanalyse, die zum messtechnischen Standardumfang an Motorprüfständen bei Volkswagen gehören (genaue Fabrikate und Spezifikation der Messgeräte siehe Anhang). Lambda wird sowohl mittels einer Breitbandlambdasonde gemessen als auch durch eine Modellrechnung aus den Abgaskonzentrationen berechnet. Letztere Methode wurde für das bereits vorgestellte Kalibrierverfahren als Referenzwert verwendet. Als Eingangsgrößen für die Berechnung dienen die Konzentrationen von NO, NO₂, C₁H_x, CO, CO₂, H₂O und O₂ im Abgas. Weiterhin geht die Zusammensetzung des verwendeten Kraftstoffs, die aus einer chemischen Analyse bekannt ist, in die Bestimmung von Lambda ein. Die Berechnung erfolgt durch ein bei Volkswagen entwickeltes iteratives Lösungsverfahren einer Verbrennungsrechnung. Da das zu lösende Gleichungssystem überbestimmt ist, kann das Ergebnis mehrfach berechnet werden. Anhand der Einzellösungen erfolgt eine Abschätzung des Fehlers, der üblicherweise im Bereich <1% liegt. Die Berechnung weist größere Fehler aus, wenn durch Fehlzündungen große Mengen unverbrannten „Frischgemisches“ in die Abgasanalyse gelangen. Insbesondere an der mageren Zündgrenze muss für eine genaue Lambdaberechnung ein hinreichend stabiler Motorlauf sichergestellt werden.

Im Fall der Messungen bei geschlepptem Motor wird der Lambdawert am Prüfstand nicht während der MIR-Messungen aufgezeichnet. Stattdessen werden der Saugrohrdruck und die Einspritzdauer aus den gefeuerten Messungen am Prüfstand eingestellt und der Lambdawert des äquivalenten, gefeuerten Betriebspunktes als Referenzwert angenommen. Da sich die Druck- und Temperaturbedingungen und somit auch die Ladungswechselbedingungen im geschleppten und gefeuerten Betrieb deutlich voneinander unterscheiden, kann die Genauigkeit nur anhand der relativen Veränderungen der Lambdaverläufe im Fall einer Lambdavaration beurteilt werden. Die aufgetretenen Abweichungen sind üblicherweise geringer als 5%.

5.3.3 Fehler bei der Lambdaberechnung mittels Kalibrierkurve

Für die Erstellung der Kalibrierkurve werden Wertepaare aus der bezogenen Absorption und dem Lambdamesswert aus der Abgasanalyse gebildet. Dabei wird vereinfachend davon ausgegangen, dass der Saugrohrdruck während der Ansaugphase proportional zu der anschließend im Zylinder befindlichen Luftmenge ist. Wie bereits in Kapitel 5.2.4 erläutert wurde, wird hierzu die korrigierte Absorption mit dem Quotienten aus dem Bezugssaugrohrdruck (p_{ref}) und dem Saugrohrdruck (p_{sau}) der Messung multipliziert. Der Zusammenhang ist in folgender Funktion wiedergegeben:

$$\text{bezogene Absorption} = \text{korrigierte Absorption} \cdot \frac{p_{ref}}{p_{sau}} \quad (5.18)$$

Bei vorhandenem Restgasanteil x_{rest} kann die Gleichung wie folgt erweitert werden:

$$\text{bezogene Absorption} = \text{korrigierte Absorption} \cdot \frac{p_{ref} \cdot (1 - x_{rest, \text{Bezug}})}{p_{sau} \cdot (1 - x_{rest, \text{Messung}})} \quad (5.19)$$

Solange sich die Restgaskonzentration zwischen den verschiedenen Betriebspunkten nicht verändert, ist der Quotient der Restgasanteile eins und kann somit ignoriert werden. Sofern der Restgasanteil bekannt ist (z.B. aus der Abgasanalyse am Motorprüfstand), kann dessen Effekt auf die Messwerte gemäß Formel 5.19 berücksichtigt werden. Ist der Restgasanteil hingegen unbekannt und zwischen den Messungen veränderlich, so wirkt sich dieser Fehler linear auf die berechnete bezogene Absorption, die zur Berechnung des Lambdawertes verwendet wird, aus. Verändert sich der Restgasanteil z.B. von 0% während des Referenzpunktes auf 10% während des Messpunktes, so folgt daraus ein Fehler der bezogenen Absorption in Höhe von ca. -11% (die Absorption erscheint zu gering).

Analog zur Betrachtung der Fehlerfortpflanzung bei der Bestimmung der korrigierten Absorption aus den Eingangsgrößen in Kapitel 5.3.1 kann auch hier die Auswirkung auf das Ergebnis der Lambdaberechnung bestimmt werden.

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{-0,9824}{\text{bez. Abs}} \cdot \Delta \text{bez. Abs} \quad (5.20)$$

Der relative Lambdafehler verhält sich somit umgekehrt proportional zum relativen Summenfehler der bezogenen Absorption, der sich additiv aus den verschiedenen Fehlerquellen zusammensetzt. Der Lambdaverlauf eines Betriebspunktes mit einer um 10% zu geringen bezogenen Absorption würde dadurch ca. 10% zu mager erscheinen.

Im Rahmen der in dieser Arbeit durchgeführten Versuche ist davon auszugehen, dass der Lambdawert zum Zündzeitpunkt im Einzelzyklus mit einem Fehler von $\pm 10\%$ bestimmt wird. Bei Mittelung von 100 Zyklen ist der Fehler bei stochastisch streuenden Größen wie dem Detektorrauschen um den Faktor 10 kleiner. Systematische Fehler, wie die Restgas- bzw. Restkraftstoffkonzentration werden durch die Mittelung nicht verringert.

6 Diskussion der Ergebnisse

Der erste Teil der vorliegenden Arbeit befasst sich mit der Optimierung von Gemischbildungsuntersuchungen mittels Laser-induzierter Fluoreszenz (LIF) mit dem Ziel, die optischen Zugänge zum Brennraum zu minimieren und die Zeitauflösung zu erhöhen. Erst genanntes geschieht durch Einbringung von Hülsen an geeigneten Stellen im Zylinderkopf. Der Aufwand für den Umbau des Zylinderkopfes ist gegenüber Transparent- oder Glasringmotoren deutlich geringer. In der Regel kann der Motor weiterhin auf allen Zylindern betrieben werden, was ein deutlicher Vorteil gegenüber üblichen optischen Motoren ist, die in der Regel als Einzylindermotor konstruiert werden oder aufgrund der eingebrachten optischen Komponenten nicht mehr auf allen Zylindern gefeuert betrieben werden können.

In Verbindung mit einem UV-tauglichen Endoskop bzw. unter Verwendung eines UV-Kameraobjektivs mit einer Brennraum-nahen Zerstreuungslinse ist es möglich, LIF-Messungen an Eurosuper im Vollmotor durchzuführen. Beide Verfahren sind grundsätzlich sowohl für Untersuchungen im Schleppbetrieb als auch für Versuche im gefeuerten Motorbetrieb geeignet, wobei sich der Ansatz unter Verwendung der Zerstreuungslinse als vorteilhaft herausgestellt hat. Die Bildhelligkeit und die Qualität der Objektivbilder übertreffen die Ergebnisse der Messungen mit Endoskop deutlich. Letzteres zeigt zwar einen größeren Blickwinkelbereich, allerdings enthält die Optik keine chromatische Korrektur, so dass für eine scharfe Abbildung schmalbandige Filter verwendet werden müssen, die die Bildhelligkeit stark reduzieren. Im gefeuerten Betrieb ist die Nutzung von Endoskopen aufgrund der geringen Temperaturfestigkeit und der mechanischen Anfälligkeit nur eingeschränkt möglich. Messungen mit einem Thermoelement in der Zylinderkopfhülse haben ergeben, dass die Temperatur innerhalb von wenigen Sekunden auf über 150°C ansteigt und somit den zulässigen Betriebsbereich des verwendeten Standard-Endoskops überschreitet. Wird der Motor an seiner Laufgrenze betrieben, so steigen die Schwankungen des Mitteldrucks gegenüber dem normalen Kennfeldbetrieb an. Daraus resultiert ein ungleichmäßigerer Motorlauf, der von verstärkten Schwingungen des Motors in den Motorlagern begleitet wird. Da die Kamera sowie das Endoskop Prüfstands-fest montiert sind, besteht hierbei die Gefahr, dass die Endoskopspitze durch Kontakt zu den Wänden der Zylinderkopfhülse beschädigt wird. Beide Probleme lassen sich durch größere Hülsen im Zylinderkopf minimieren, allerdings ist dies ein Zielkonflikt hinsichtlich der gewünschten geringst möglichen thermodynamischen Beeinflussung der motorischen Randbedingung. Die Teilung des Abbildungssystems im Falle der Brennraum-nahen Zerstreuungslinse in Verbindung mit dem UV-Objektiv führt zu einer mechanischen Entkoppelung von Motor und Kamera. Dadurch ist der optische Aufbau am Motorprüfstand in der Praxis deutlich robuster gegenüber Schwingungen des Prüflings. Hinsichtlich der thermischen Belastbarkeit konnten keinerlei Einschränkungen festgestellt werden, so dass die Vorteile dieses Aufbaus hier in der Praxis des Prüfstandsbetriebes überwiegen und somit der Verwendung eines einteiligen Endoskops vorzuziehen ist.

Durch die im Vergleich zu üblichen optisch zugänglichen Motoren sehr kleinen Zugänge (Durchmesser 10 mm) entstehen nur geringe thermodynamische Abweichungen zum Serienmotor, so dass sich die gewonnenen Erkenntnisse direkt auf den Vollmotor übertragen lassen. Weiterhin sind die im Vergleich zu herkömmlichen optisch zugänglichen Motoren kleinen Fenster

stabiler und einfacher abzudichten, so dass auch der Last- und Drehzahlbereich für gefeuerte Untersuchungen im Vergleich zu Transparentmotoren erweitert werden kann. Besonders bei hohen Drehzahlen und Lasten wirkt sich dies positiv auf die Bildqualität aus, da sich hier bei Untersuchungen im geschleppten Betrieb in der Regel große Mengen flüssigen Kraftstoffs auf den Fenstern niederschlagen und somit durch Streulicht und Fluoreszenz zu einer Minderung der Bildqualität führen. Im gefeuerten Betrieb sind die Wandtemperaturen deutlich höher, so dass die Benetzung der Oberflächen schwächer ausfällt. Die mittels dieser Technik aufgezeichnete qualitative Verteilung des Kraftstoffs im Brennraum ist daher gut als Ergänzung zur Indizier-technik bei der Gemischbildungsanalyse geeignet.

Zur Erhöhung der Zeitauflösung von LIF-Messungen wurden Untersuchungen mit einer Streak-Kamera im sogenannten Framingmodus in Verbindung mit einem schnell repetierenden Frequenz-verdoppelten Nd:YLF-Laser und Rhodamin als Kraftstoff-Tracer durchgeführt. Die Zugabe eines Tracers ist bei dieser Lichtquelle notwendig, da Kraftstoff für Licht mit einer Wellenlänge von 527 nm transparent ist. Mit diesem Ansatz ist es möglich, Bildsequenzen zu fünf aufeinander folgenden Kurbelwinkeln innerhalb eines Motorzyklus darzustellen. Vorteilhaft gegenüber Streulichtmessungen ist hierbei die stärkere Beschränkung des Bildes auf die Lichtschnittebene und die geringere Anfälligkeit gegenüber Streulichtreflexen am Glasring. Bei der Untersuchung von Schichtbetriebspunkten, bei denen auch zu späten Zeitpunkten noch ein hoher flüssiger Kraftstoffanteil vorliegt, kann die Bewegung der Gemischwolke durch das neue Verfahren innerhalb eines Zyklus nachvollzogen werden. Dies ist ein deutlicher Vorteil gegenüber der zeitgleich durchgeführten stroboskopischen Messung mit einem „Standard-LIF-System“, bei der der Kraftstofftransport durch eine Reihe von Momentaufnahmen aus verschiedenen Zyklen nachgebildet wird. Bei der Beurteilung der Gemischbildung in homogenen Betriebspunkten, wenn die Verdampfung bereits weit fortgeschritten ist, stößt das vorgestellte Messsystem dann an seine Grenzen. Hier liegt noch Potential in der Steigerung der Empfindlichkeit des Aufzeichnungssystems. Mittlerweile sind bildverstärkte Hochgeschwindigkeitskameras erhältlich [71], deren Auflösung gegenüber der verwendeten StreakStar-Kamera deutlich verbessert ist. Weiterhin ist die Laserentwicklung gegenüber dem Zeitpunkt der Durchführung der beschriebenen Versuche fortgeschritten, so dass nun Dioden-gepumpte, Frequenz-vervierfachte Nd:YAG-Laser verfügbar sind [54]. In Kombination mit einer intensivierten High-Speed-Kamera wäre es so möglich, High-Speed-LIF mit Realkraftstoff ohne Zugabe eines Tracers durchzuführen. Bei ausreichender Lichtausbeute könnte so auch der verdampfte Kraftstoff detektiert werden, der bei Verwendung von Rhodamin als Tracer, das nur in gelöster Form fluoresziert, prinzipbedingt nicht erfasst werden kann.

Eine weitere Möglichkeit, das Verfahren zu verbessern, wäre, einen Tracer zu wählen, der ähnliche Verdampfungseigenschaften wie Ottokraftstoff aufweist und auch in der Gasphase fluoresziert. In Verbindung mit nun verfügbaren hochrepetierenden UV-Lasern ist das Spektrum der verfügbaren Tracer gegenüber einer Anregungslichtquelle mit grünem Licht deutlich vergrößert [43].

Das im zweiten Teil der Arbeit vorgestellte Absorptionsmessverfahren ist in der Lage, zyklus-

und kurbelwinkelaufgelöste Messungen der Kraftstoffkonzentration im Brennraum von Serienmotoren in unmittelbarer Nähe der Zündkerzenelektrode durchzuführen. Durch den an Stelle der Zündkerze montierten Sensor können Absorptionsmessungen in Serienmotoren ohne weitere konstruktive Änderungen durchgeführt werden, was den Aufwand, der für einen Einsatz der Messtechnik am Motorprüfstand betrieben werden muss, gering hält. Der im Rahmen dieser Arbeit verwendete Sensor wird in zwei Ausbaustufen eingesetzt. Die erste Version des Sensors ist nicht zündfähig und nutzt den Bauraum der Originalzündkerze vollständig für die optischen Komponenten. Die Untersuchungen im gefeuerten Motorbetrieb wurden mit dem weiterentwickelten Sensor durchgeführt, bei dem die Absorptionsstrecke exzentrisch verschoben wurde, um Bauraum für die Elektroden der integrierten Zündkerze zu schaffen. Durch die außermittige Anordnung verschiebt sich die Absorptionsstrecke auf einer Kreisbahn um die Mittelachse in Abhängigkeit von der Einschraubposition des Sensors. Ist eine bestimmte Position gewünscht, so kann diese durch Verwendung unterschiedlich starker Unterlegscheiben beim Einschrauben des Sensors in den Zylinderkopf erreicht werden. Weiterhin ist die Absorptionsstrecke im Fall des zündfähigen Sensors kürzer als im Fall des nicht zündfähigen Sensors, da ein Teil des Bau-raums für den Zündkerzenkörper verwendet wird. Dies führt bei sonst gleichen Randbedingungen zu einer Verminderung der Absorption und einem schlechteren Signal- zu Rausch-Verhältnis, was durch eine optimierte Faserein- und Auskoppelung und somit durch eine Steigerung der Amplitude des modulierten Detektorsignals (Rohsignal) kompensiert werden kann. Eine verbesserte dritte Variante des Sensors, die zum Zeitpunkt der Durchführung der hier zugrunde liegenden Messungen noch nicht zur Verfügung stand, weist durch entsprechende Optimierungen ein um den Faktor sieben verbessertes Signal zu Rausch-Verhältnis auf, was die Genauigkeit des Verfahrens weiter verbessert.

Zur Bestimmung der Absorption aus den Rohsignalverläufen ist die korrekte Bestimmung der Bezugsintensität von großer Bedeutung. Idealerweise ist dies die gemessene Intensität, wenn die Konzentration des absorbierenden Mediums in der Messstrecke null ist. Dieser Zustand lässt sich weder im geschleppten noch im gefeuerten Motorbetrieb erreichen, daher wird ein Verfahren genutzt, um den Einfluss des vorhandenen Restkraftstoffs abzuschätzen. Im Schichtbetrieb sind die Restkraftstoffkonzentrationen am Ende der Ansaugphase des aktuellen Motorzyklus durch die Verdünnung mit der angesaugten Frischluft so gering, dass der Einfluss des Restkraftstoffs durch die Wahl eines geeigneten Zeitpunkts im Bereich des unteren Totpunkts vernachlässigt werden kann. In diesem Betriebsmodus ist somit keine Kompensation des Restkraftstoffeinflusses notwendig. Im Homogenbetrieb hingegen ist eine Bestimmung der Referenzintensität in diesem Zeitraum nicht mehr möglich, da der „frische“ Kraftstoff zu diesem Zeitpunkt bereits eingespritzt wurde. Eine Bestimmung der Restkraftstoffkonzentration im aktuellen Zyklus vor der Einspritzung (0 – 25°KW) hat sich als nicht ausreichend robust erwiesen, da insbesondere bei gedrosseltem Motor im Homogenbetrieb die auftretenden Druckänderungen zu Ausgasungen von Kraftstoff aus Spalten im Brennraum führen, so dass die Bestimmung des Restkraftstoffs zu stark schwankt und der Zeitraum für eine Mittelung kurz ist. Da das Messverfahren fortlaufende Motorzyklen aufzeichnet und die Restkraftstoffkonzentration im aktuellen Zyklus maßgeblich durch den Brennverlauf des Vorgängerzyklus beeinflusst wird, kann die Restkraftstoffkonzentration spät im Vorgängerzyklus bestimmt werden. Dabei hat sich herausgestellt,

dass bei einer Mittelung des Intensitätssignals über ca 50°KW spät in der Ausschubphase eine Korrelation mit den im Abgas gemessenen Kraftstoffkonzentrationen besteht. Der Zeitraum des Intervalls kann in Abhängigkeit von den Steuerzeiten der Auslassventile angepasst werden. In der Praxis hat sich gezeigt, dass das Intervall für optimale Ergebnisse vor dem Schließen der Auslassventile bzw. vor dem Öffnen der Einlassventile im Fall von Ventilüberschneidung liegen sollte. Eine empirische Überprüfung der Abschätzung durch zusätzliche Messungen mit geeigneten Parametervariationen hat eine gute Übereinstimmung ergeben. Bei Messungen mit geschlepptem Motor kann diese Restkraftstoffkonzentration nicht bestimmt werden, so dass auf eine Korrektur dieses Einflusses verzichtet werden muss. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche zeigen, dass diese Vorgehensweise sowohl für verschiedene Kraftstoffe (EuroSuper, Isooktan) als auch für verschiedene Motoren zielführend ist.

Der so bestimmte Absorptionsverlauf ist in erster Näherung (siehe Kapitel 3.2.3) proportional zur Kraftstoffdichte in der Messstrecke. Bei der Brennverfahrenentwicklung ist allerdings weniger die Kraftstoffdichte von Interesse als viel mehr das Luft-Kraftstoff-Verhältnis. Die Umrechnung der Absorption in eine Lambda-proportionale Größe erfolgt zunächst durch die Kompensation des Dichteanstiegs während der Kompressionsphase. Die zwei hierzu vorgestellten Methoden basieren zum einen auf Messungen des Brennraumsdrucks und einer Berechnung der Gastemperatur und zum anderen auf einer Berechnung der Volumenänderung des Gemisches in Brennraum in Abhängigkeit vom Kurbelwinkel. Es hat sich herausgestellt, dass letztere Methode im gefeuerten Betrieb zu geringeren Fehlern führt und somit vorzuziehen ist, da insbesondere die Modelle zur Bestimmung der Temperatur im Brennraum nach der Verbrennung sehr komplex sind, wohingegen die Bestimmung der Volumenänderung anhand einfacher Verrechnung geometrischer Größen erfolgen kann. Da das Verfahren von einem geschlossenen Volumen ausgeht, gilt die Berechnung lediglich für den Zeitraum geschlossener Ein- und Auslassventile. Dies stellt gegenüber dem Verfahren unter Bestimmung von Druck und Temperatur keine Einschränkung dar, da die Berechnung der Temperaturen im Brennraum bei geöffneten Ventilen ebenfalls nur abgeschätzt werden kann. Bei geöffneten Ein- oder Auslassventilen ist lediglich ein relativer Vergleich der Betriebsparametervariationen möglich.

Die Bestimmung von Lambda aus der bezogenen Absorption erfolgt durch Kalibriermessungen im Motorbetrieb, die auf verschiedenen idealisierten Annahmen beruhen. Daraus resultiert eine vergrößerte Unsicherheit der Ergebnisgröße, deren Betrag in Kapitel 5.3 abgeschätzt wird. Ein wesentlicher Einflussfaktor ist die im Brennraum verbleibende bzw. die zurückgespülte Restgasmenge. Ist die Restgasmenge mittels der an Motorprüfständen typischerweise eingesetzten Indizier- und Abgasmesstechnik bestimmbar, so kann der Einfluss auf den Lambdawert berechnet und entsprechend korrigiert werden. Fehler bei der Abschätzung der Restgasmenge wirken sich direkt proportional auf den Fehler des Lambdawertes aus. Betrachtet man gemittelte Verläufe aus 100 Zyklen so reduziert sich der Fehler der stochastisch streuenden Größen um den Faktor 10. Die systematischen Fehler, wie die Restgas- bzw. Restkraftstoffkonzentration, werden durch die Mittelung nicht verringert. Im Rahmen der in dieser Arbeit durchgeführten Messungen wurde der Motor ohne externe Abgasrückführung betrieben, so dass die Variationen der Restgaskonzentration nur durch interne Abgasrückführung verursacht werden können. Anhand

der geringen Abweichungen der Kalibriermessungen, die mit unterschiedlichen Saugrohrdrücken und Einspritzmengen und daraus resultierenden Motorlasten durchgeführt wurden, ist zu erkennen, dass sich die Restgasmengen im Rahmen der hier betrachteten Betriebspunkte nur sehr geringfügig verändert haben ($< 5\%$). Es ist daher davon auszugehen, dass die Summe der Fehler im Einzelzyklus zum Zündzeitpunkt hier kleiner als 10% ist. Wird der Motor mit stark unterschiedlichen Restgasmengen betrieben, so lässt sich die angesaugte Frischluftmenge nicht mehr mit ausreichender Genauigkeit anhand des Saugrohrdrucks abschätzen. In diesem Fall müsste die Restgasmenge auf anderem Wege bestimmt werden. Dies kann zum Beispiel über Modelle zur Berechnung der Zylinderfüllung und des Restgasanteils, die auf der Auswertung der für diesen Zweck zusätzlich aufgezeichneten Druckverläufe im Saugrohr und im Abgaskrümmen beruhen, erfolgen. Sofern diese Zusatzinformationen in ausreichender Genauigkeit zur Verfügung stehen, können diese Informationen bei der Auswertung der Absorptionssensordaten verwendet werden, um die Qualität der Messungen zu verbessern.

Bei den dieser Arbeit zugrunde liegenden Prüfstandsversuchen wurde sowohl EuroSuper als auch Isooktan als Kraftstoff verwendet. Die jeweiligen Kalibrierkurven zur Zuordnung von Absorption und Lambda unterscheiden sich nur durch eine Parallelverschiebung, was auf die unterschiedlichen Absorptionsquerschnitte der Kraftstoffe zurückzuführen ist. Solange eine ausreichende spektrale Überlappung des Absorptionsspektrums des Kraftstoffs und des Transmissionspektrums des verwendeten Filters sichergestellt ist (siehe Kapitel 3.2.3), ist davon auszugehen, dass das Messsystem auch mit weiteren alternativen Kraftstoffen eingesetzt werden kann. Die Signalauswertung und die Vorgehensweise bei der Anwendung des Systems kann beibehalten werden.

Wie anhand der vorgestellten Messergebnisse gezeigt wurde, können die mittels des MIR-Sensors gewonnenen Lambdaverläufe genutzt werden, um die Güte der Gemischbildung sowohl im Homogenbetrieb als auch im Schichtbetrieb zu analysieren und die klassische Zylinderdruckanalyse zu ergänzen. Die erzielbare Genauigkeit reicht bereits im aktuellen Baustand aus, um insbesondere im Bereich des Zündzeitpunkts quantitative Aussagen zur Gemischzusammensetzung im Einzelzyklus treffen zu können. Mit Blick auf die Verbesserungen, die bereits in einen aktuellen Entwicklungsstand eingeflossen sind, ist davon auszugehen, dass der quantitativ nutzbare Messbereich weiter ausgedehnt werden kann. Da der Sensor in der Lage ist, fortlaufende Motorzyklen mit Kurbelwinkelauflösung aufzuzeichnen, eignet sich das System sehr gut zur Untersuchung von sporadisch auftretenden Gemischbildungsphänomenen bzw. zur Untersuchung von Betriebsmodusumschaltungen oder instationären Testverläufen im Einzelzyklus. Für einen eventuellen Dauer- oder Langzeiteinsatz des Sensors bedarf es einer Optimierung der Spiegelanbindung an die thermischen Randbedingungen des Motors. Analog zur Anpassung des Wärmewertes einer Serienzündkerze an Erfordernisse des jeweiligen Motors besteht hier Verbesserungspotential. Bei der Auslegung des Sensorkopfes gilt es, den jeweils besten Kompromiss zwischen ausreichender Selbstreinigung und geringem Verschleiß sowie der Vermeidung von Glühzündungen im Volllastbereich zu finden. Im aktuellen Baustand wird der Spiegel durch seine exponierte Lage und die geringe Wärmeabfuhr über die Stege zur Halterung bei höheren Lasten sehr heiß, was zu einem irreversiblen Verschleiß der optischen Eigenschaften

der Spiegeloberfläche führt und die mögliche Messdauer verkürzt. Eine weitere Verbesserungsmöglichkeit des aktuellen Systems besteht in der weiteren Miniaturisierung der optischen Komponenten im Sensorskopf. Ziel weiterer Entwicklungen ist hier eine Anpassung der notwendigen Komponenten, um den Sensor auch auf Basis einer Zündkerze mit reduziertem Gewindedurchmesser (M12) zu realisieren, da diese immer häufiger in Motorneuentwicklungen zum Einsatz kommen.

Der zeitgleiche Einsatz der LIF-Messtechnik durch kleine Öffnungen in Verbindung mit dem MIR-Sensor zeigt, dass sich beide Verfahren bei der Gemischbildungsanalyse sinnvoll ergänzen (siehe Kapitel 5.1.9). Über die Absorptionsmessungen ist es möglich, quantifizierbare Messwerte des Lambdawertes in der Nähe der Zündkerze zu bestimmen. Die LIF-Bilder bieten ergänzend die Möglichkeit, die flächige Verteilung des Kraftstoffs zu visualisieren. Auf diese Weise kann bereits im aktuellen Entwicklungsstand unterschieden werden, ob der gemessene Lambdaverlauf an der Zündkerze ein lokal beschränktes Phänomen ist, oder ob der Lambdaverlauf auch für einen größeren Bereich des Brennraums als repräsentativ angesehen werden kann. Im Idealfall würden die Messergebnisse des Absorptionssensors dazu genutzt, die flächige Verteilung des Kraftstoffs im LIF-Bild zu quantifizieren. Hierzu soll im Folgenden kurz ein mögliches Vorgehen und die bestehenden Einschränkungen diskutiert werden.

Man führt zunächst eine Betriebspunktvariation mit unterschiedlichen Lambdawerten aus, wobei zu jedem Kurbelwinkel bzw. in einer definierten Schrittweite ein LIF-Bild aufgezeichnet wird. Parallel erfolgt der Einsatz des MIR-Sensors. Für jedes Einzelbild wird anschließend ein mittlerer Intensitätswert in einem Auswertefenster in der Nähe der Zündkerze gebildet und dem zeitgleich bestimmten Lambdawert zugeordnet. Führt man dies für eine Reihe von Zyklen durch, so erhält man eine kurbelwinkelindividuelle Kalibrierfunktion mittels der man den LIF-Intensitätswert im Gesamtbild zum jeweiligen Kurbelwinkel einem Lambdawert zuordnen kann. So entstünde für jedes Einzelbild eine zweidimensionale Lambdakarte für den betrachteten Brennraumbereich. Die Erstellung von kurbelwinkelindividuellen Kalibrierkurven ist notwendig, da sich die fluoreszenzintensitätsbeeinflussenden Faktoren wie Brennraumdruck und Brennraumtemperatur insbesondere während der Kompressionsphase schnell ändern und somit nicht ohne weitere Berechnungen für veränderte Randbedingungen gültig sind.

Dieses Vorgehen beinhaltet eine Reihe von Vereinfachungen, die bei der Betrachtung der zu erwartenden Ergebnisse berücksichtigt werden müssen. Zum einen beruht die Erstellung der Kalibrierfunktion auf der Annahme, dass sich die Druck- und Temperaturverhältnisse im Brennraum, die die Fluoreszenzintensität maßgeblich beeinflussen, von Zyklus zu Zyklus nicht signifikant verändern und die Schwankungen der Fluoreszenzintensität somit ausschließlich auf die Unterschiede der Kraftstoffkonzentration im betrachteten Auswertefenster zurückzuführen sind. Zum anderen wird angenommen, dass die Helligkeitsverteilung des LIF-Bildes ausschließlich durch die tatsächliche Verteilung des verdampften Kraftstoffs im Brennraum hervorgerufen wird. Ungleichförmigkeiten in der Laserausleuchtung, flüssiger Kraftstoff oder Fluoreszenzsignal durch Streulicht von benetzten Oberflächen außerhalb der Lichtschnittebene würden die Güte des Ergebnisses daher beeinträchtigen. Weiterhin besteht keine Möglichkeit, die Restgasmenge

zu visualisieren, daher wird von einer homogenen Verteilung im Brennraum ausgegangen, was die quantitative Auswertung ebenfalls beeinträchtigt. Um diese Fehlerquellen zu minimieren, könnte man den Einsatz des Verfahrens zunächst auf Teile des Motorzyklus beschränken, wo davon auszugehen ist, dass der Kraftstoff bereits vollständig verdampft ist. Zu diesen späten Zeitpunkten in der Kompressionsphase steigt auch, wie bereits dargestellt, die Messgenauigkeit des MIR-Sensors an, was die Qualität des Ergebnisses ebenfalls verbessert.

Im hier vorliegenden Fall reichen die Qualität der LIF-Bilder und das daraus resultierende Signal zu Rauschverhältnis leider nicht für eine quantitative Auswertung der parallel durchgeführten Absorptionsmessungen aus. Die angefügten Bilder einer Kalibrierkurve und der Lambdaverteilung sollen daher lediglich einen Eindruck vermitteln, wie ein Ergebnisbild bei entsprechender Verbesserung des MIR-Systems und LIF-Messungen aussehen kann.

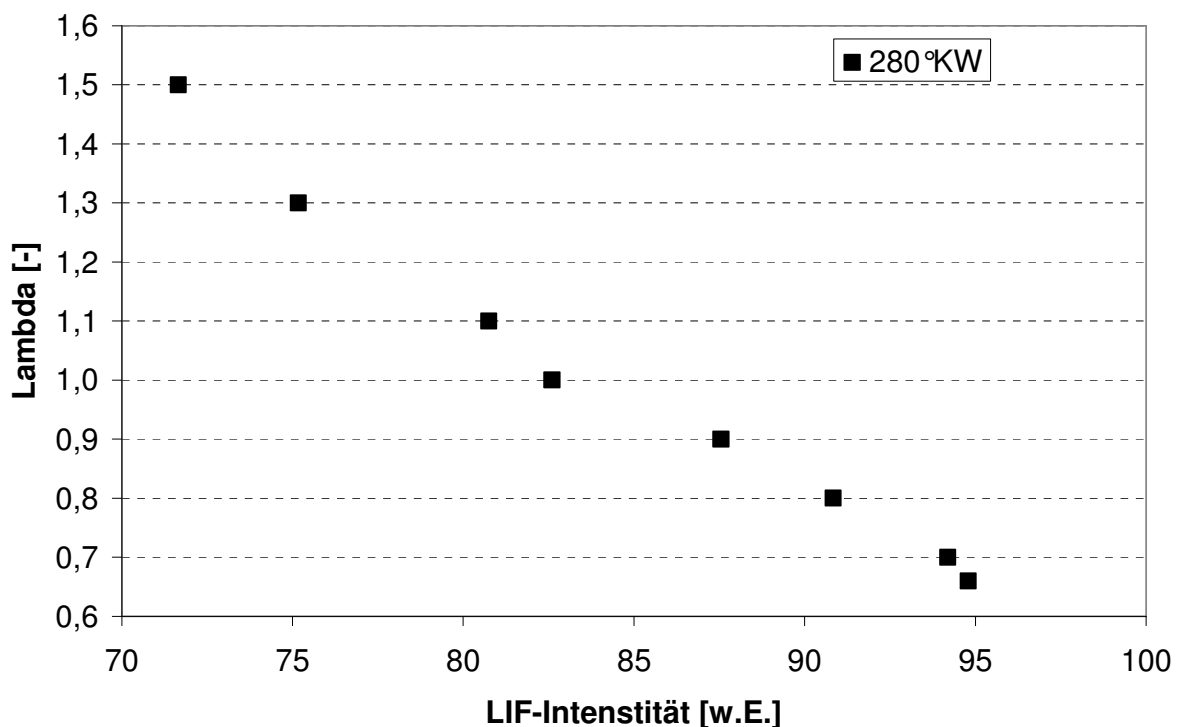


Abbildung 6.1: Kalibrierkurve zur Zuordnung von LIF-Intensitäten zu Lambdawerten für den Zeitpunkt 280 °KW, direkteinspritzender Homogenbetrieb

Der Kalibrierkurve in Abbildung 6.1 liegt die Auswertung einer Lambdavariation in der Kompressionsphase des Homogenbetriebs zu Grunde. Der mittlere LIF-Intensitätswert im Auswertefenster unterhalb der Zündkerze und der zeitgleich bestimmte Lambdawert des MIR-Sensors bilden jeweils eine Stützstelle der Näherungskurve, anhand der anschließend den gemessenen LIF-Intensitäten innerhalb des Lichtschnitts Lambdawerte zugeordnet werden.

Die Abbildung 6.2 zeigt beispielhaft ein entsprechendes Ergebnisbild. Der Lambdawert ist gemäß der im Bild dargestellten Farbskala kodiert und flächig dargestellt. Aufgrund der oben genannten Einschränkungen kann das Ergebnis hier nicht quantitativ ausgewertet werden. Die

quantitative zweidimensionale Darstellung soll lediglich einen Eindruck davon vermitteln, wie ein Ergebnisbild bei entsprechender Weiterentwicklung der Verfahren aussehen könnte.

Abschließend bleibt festzustellen, dass beide Verfahren unter Verwendung von Realkraftstoff bei minimalen thermodynamischen Abweichungen in seriennahen Motoren eingesetzt werden können. Der Absorptionssensor kann im Austausch gegen die Zündkerze sogar in Serienmotoren eingesetzt werden. Durch diese zusätzlichen Einblicke in die Gemischbildungsphänomene stellen beide Techniken daher eine sinnvolle Ergänzung zur Indiziertentechnik da.

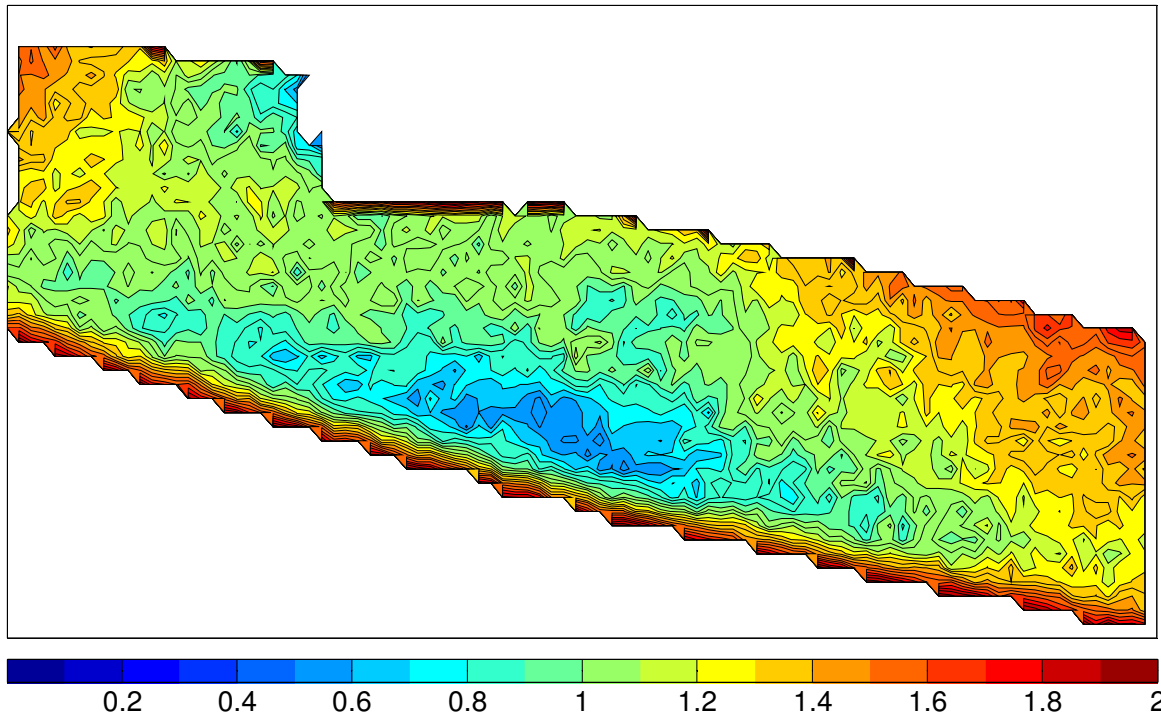


Abbildung 6.2: Quantitatives Beispielbild einer zweidimensionalen Lambdaverteilung in der Lichtschnittebene zum Zeitpunkt 280°KW, direkteinspritzender Homogenbetrieb (zu Illustrationszwecken)

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Weiterentwicklung aktueller ottomotorischer Brennverfahren und die Entwicklung neuer Brennverfahren erfordert die genaue Kenntnis der Gemischbildungsabläufe im Brennraum. Mittels etablierter Messverfahren wie der Laser-induzierten Fluoreszenz oder mit Hilfe von Absorptionsmessung können die Kraftstoffverteilung bzw. die Kraftstoffkonzentration von Gemischen analysiert werden. Ziel dieser Arbeit war, die bestehenden Techniken aufzugreifen und für einen minimalinvasiven Einsatz in direkteinspritzenden Ottomotoren anzupassen. Die Schwerpunkte lagen hierbei auf der Minimierung der optischen Zugänge sowie auf der Realisierung von Messungen mit größtmöglicher Wiederholrate.

Der erste Teil der vorliegenden Arbeit befasst sich mit der Optimierung von Verfahren zur Gemischbildungsuntersuchung mittels Laser-induzierter Fluoreszenz (LIF) mit dem Ziel, die Größe der optischen Zugänge zum Brennraum zu minimieren. Dies wurde durch die Verwendung von kleinen Brennraumfenstern (10 mm) erreicht, die mit Metallhülsen in den Zylinderkopf eines seriennahen 4-Zylinder-Motors eingeschraubt werden. Die kleinen Öffnungen führen zu den gewünschten geringen Veränderungen der thermodynamischen Randbedingungen, allerdings bedarf es spezieller Optiken, um trotz der eingeschränkten optischen Zugänge ausreichend große Blickwinkel in den Brennraum zu erzielen. Im Rahmen dieser Arbeit werden zwei alternative Ansätze vorgestellt. Zum einen erfolgt der Einsatz eines Stabendoskops, das auf maximale Transmission im UV-Spektrum optimiert wurde, und zum anderen wird die Kombination aus einer Brennraum-nahen Zerstreuungslinse in Verbindung mit einem Standard-UV-Objektiv verwendet. Die Versuche am geschleppten und gefeuert betriebenen Motor zeigen, dass letztere Variante mit zweiteiliger Optik in den meisten Anwendungsfällen aufgrund der größeren mechanischen Robustheit, der besseren Abbildungsleistung und ihrer Unempfindlichkeit gegenüber hohen Temperaturen und Drehzahlen (volllasttauglich) dem Stabendoskop vorzuziehen ist. Dieses erzielt zwar größere Blickwinkel, allerdings werden dessen Messergebnisse durch die Bildhelligkeit und die Qualität der Objektivbilder deutlich übertroffen. Für die Beurteilung der qualitativen Gemischverteilung im Brennraum ist die Lösung mit Zerstreuungslinse und Objektiv daher in den meisten Fällen besser geeignet.

Zur Erhöhung der Bildfolgerate von LIF-Messungen wurden Untersuchungen mit einer Streak-Kamera im sogenannten Framingmodus an einem Glasringmotor durchgeführt. Als Lichtquelle wurde ein schnell repetierender Frequenz-verdoppelter Nd:YLF-Laser (527 nm) eingesetzt, der zur Anregung von Rhodamin als Kraftstoff-Tracer diente. Mit dem Bildfolgerate-optimierten Ansatz ist es möglich, die Ausbreitung des flüssigen Kraftstoffs zu fünf aufeinander folgenden Kurbelwinkeln innerhalb eines Motorzyklus darzustellen. Zeitgleich wurden zyklusaufgelöste LIF-Messungen mit einem KrF*-Laser (248 nm) zur Anregung des Realkraftstoffs und einer bildverstärkten Kamera zur Aufzeichnung des Fluoreszenzsignals durchgeführt und die Ergebnisse verglichen. Insbesondere im Schichtbetrieb, wo auch spät in der Kompressionsphase noch große Anteile flüssigen Kraftstoffs vorliegen, ist die schnelle Bildfolge ein Vorteil gegenüber den stroboskopischen LIF-Messungen, bei denen der Kraftstofftransport aus mehreren Bildern verschiedener Motorzyklen zusammengesetzt wird. Die Analyse von Kurbelwinkelaufgelösten Bildsequenzen ermöglicht es, den zeitlichen Verlauf des Kraftstofftransports und dessen Schwan-

kungen zu beurteilen. Stroboskopische Untersuchungen hingegen können nur Serien von Momentaufnahmen ohne direkten Bezug darstellen, was die Analyse von Zyklusschwankungen erschwert. Ein Vorteil der zeitaufgelösten LIF-Messungen gegenüber Streulichtmessungen an flüssigem Kraftstoff ist die stärkere Beschränkung des Bildes auf die Lichtschnittebene und die geringere Anfälligkeit gegenüber Streulichtreflexen am Glasring.

Bei der Beurteilung der Gemischbildung im Homogenbetrieb stößt das hier vorgestellte System mit dem Fortschreiten der Verdampfung des flüssigen Kraftstoffs an seine Grenzen. Ist dieser vollständig verdampft, kann keinerlei Fluoreszenz mehr detektiert werden, da Rhodamin nur in gelöster Form fluoresziert.

Hier besteht aufgrund der gegenüber dem Zeitpunkt der Messung erfolgten Weiterentwicklung sowohl auf der Anregungs- als auch auf der Detektionsseite Verbesserungspotential. Mittlerweile sind Dioden-gepumpte, Frequenz-vervierfachte Nd:YAG-Laser verfügbar, die in Kombination mit einer intensivierten High-Speed-Kamera dazu genutzt werden könnten, High-Speed-LIF mit Realkraftstoff ohne Zugabe eines Tracers durchzuführen. Bei ausreichender Lichtausbeute wäre so auch eine direkte Beurteilung der Ausbreitung des verdampften Kraftstoffs möglich. Eine weitere Möglichkeit, das Verfahren zu verbessern, wäre, einen Tracer zu wählen, der auch in der Gasphase fluoresziert und dessen Verdampfungseigenschaften denen von Realkraftstoff ähneln. Mittlerweile sind hochrepetierende UV-Laser verfügbar, so dass die Auswahl an verfügbaren Tracern gegenüber einer Anregungslichtquelle mit grünem Licht deutlich vergrößert ist [43].

Im zweiten Teil der Arbeit wird ein Absorptionsmessverfahren vorgestellt, das in der Lage ist, zyklus- und kurbelwinkel aufgelöste Messungen der Kraftstoffkonzentration im Brennraum von Serienmotoren in unmittelbarer Nähe der Zündkerzenelektrode durchzuführen. Der im Rahmen dieser Arbeit verwendete Sensor wurde in einem vom Land Niedersachsen geförderten Projekt „Mimose“ gemeinsam von Volkswagen und den Projektpartnern vom Laser-Laboratorium-Göttingen und der Fa. LaVision entwickelt. Mit Hilfe des Sensors, der an Stelle der Zündkerze in den Brennraum eingesetzt wurde, konnten Absorptionsmessungen an Serienmotoren ohne weitere konstruktive Änderungen durchgeführt werden. In einem ersten Entwicklungsstand beschränken sich die Untersuchungen zunächst auf den geschleppten Motorbetrieb. Es werden die Arbeitsschritte erläutert, die notwendig sind, um aus den unter motorischen Randbedingungen gemessenen Rohlichtsignalen eine zur Kraftstoffkonzentration proportionale Absorption zu berechnen. Mittels eines Kalibrierverfahrens wird anschließend aus der berechneten Absorption ein Lambdawert bestimmt.

Das Verfahren wurde zunächst bei geschlepptem Motor sowohl im Homogenbetrieb als auch im Schichtbetrieb angewendet und kurbelwinkel aufgelöste Lambdaverläufe von gemischbildungsbeeinflussenden Parametervariationen dargestellt. Im Schichtbetrieb wurde anhand der Lambdaverläufe untersucht, wie sich eine Variation des Saugrohrdrucks auf die Stabilität des Brennverfahrens auswirkt. Die Ergebnisse aus der Lambdabestimmung liefern die Begründung für die beobachteten motorischen Phänomene, da die Betriebspunkte mit instabilem Motorlauf starke Schwankungen von Lambda im Bereich des Zündzeitpunkts aufweisen und der zündfähige Lambdabereich häufig überschritten wird.

In einer zweiten Ausbaustufe wurde der Sensor um die Zündfunktionalität für gefeuerte Untersuchungen erweitert. Es werden die notwendigen Anpassungen der Auswertestrategie erläutert, die den veränderten motorischen Randbedingungen Rechnung tragen. Da die Anwesenheit von Restkraftstoff zum Zeitpunkt der Bestimmung der Referenzintensität die Berechnung der Absorption beeinflusst, wird eine Methode vorgestellt, die es ermöglicht diesen Einfluss anhand von parallel durchgeführten Abgasmessungen abzuschätzen. Da das vorgestellte Verfahren lediglich die Kraftstoffkonzentration misst und die Luftmenge zur Lambdawertberechnung abgeschätzt werden muss, beeinflusst die im Brennraum verbleibende bzw. die zurückgespülte Restgasmenge die Güte dieser Abschätzung. Aufgrund der durchgeführten Fehlerabschätzung ist davon auszugehen, dass die Summe der Fehler im Einzelzyklus zum Zündzeitpunkt kleiner als 10% ist.

In einem Anwendungsbeispiel wird der Einfluss der Variation der Ladungsbewegung auf die zeitliche Entwicklung der Gemischzusammensetzung in einem mit Isooktan betriebenen direkt-einspritzenden 4-Zylinder-Forschungsmotor gemessen und diskutiert sowie mit Ergebnissen des gleichen Motors in einer Konfiguration mit Saugrohreinspritzung verglichen. Die Untersuchungen belegen, dass die früheste Homogenisierung im Fall der Direkteinspritzung mit hoher Ladungsbewegung erreicht wird, obwohl das zur Gemischbildung zur Verfügung stehende Zeitfenster im Fall der Saugrohreinspritzung deutlich größer ist. Anhand der Einzelzyklusanalyse konnte gezeigt werden, dass die Variation der Lambdawerte zum Zündzeitpunkt im Fall großer Ladungsbewegung am geringsten ist. Diese aus den Lambdaverläufen gewonnenen Erkenntnisse über das Brennverfahren und die Stabilität der Gemischbildung stimmen mit den motorischen Ergebnissen der Zylinderdruckindizierung überein. Eine eindeutige Zuordnung zwischen den gemessenen Lambdawerten im Einzelzyklus und dem Brennverlauf kann nicht hergestellt werden, da schon sehr geringe Lambdagradienten im Bereich der Zündkerze an den Zündgrenzen die Zündfähigkeit und den Brennverlauf stark beeinflussen und der Messort und der Ort der Funkenlage nicht identisch sind.

Im Schichtbetrieb konnte gezeigt werden, dass der Lambdawert im Falle später Einspritzungen zwar sehr stabil ist, allerdings auf sehr fettem Niveau, was eine vermehrte Rußbildung zur Folge hat, wie anhand der Abgasmesstechnik nachvollzogen werden konnte. Im Falle sehr früher Ansteuerenden kann nachgewiesen werden, dass das Gemisch zum Zündzeitpunkt bereits wieder abmagert, so dass der Frühverschiebung der Einspritzung hier Grenzen gesetzt sind. Anhand von zyklus aufgelösten Untersuchungen wurde der unmittelbare Einfluss des lokalen Lambdawertes an der Zündkerze auf die Gemischzündung nachgewiesen.

In weiteren Versuchen wurde das Verfahren an einem direkt-einspritzenden 4-Zylinder Serienmotor bei Verwendung von Eurosuper eingesetzt und die Übertragbarkeit des Verfahrens auf Serienmotoren und -kraftstoffe nachgewiesen. Bei der Auswertung der Einzelzyklen fällt auf, dass die Variation von Lambda und des Mitteldrucks deutlich geringer ausfallen als beim zuvor betrachteten Forschungsmotor, was aufgrund der optimierten Abstimmung der an der Gemischbildung beteiligten Komponenten beim Serienmotor zu erwarten ist.

Der Sensor kann im aktuellen Entwicklungsstand nur die Kraftstoffkonzentration direkt erfassen.

Bei der Berechnung von λ ist man bislang immer auf eine Abschätzung der Luftmengen bzw. Restgasmengen angewiesen. Die Güte dieser Abschätzung wirkt sich direkt auf die Genauigkeit des Verfahrens aus, daher ist die genaue Kenntnis dieser Größen von großem Interesse. Neben der Möglichkeit, die Restgasmenge über Abgasmesstechnik zu bestimmen und somit auf die angesaugte Frischluftmenge zu schließen, könnte eine weitere Optimierung des Systems durch eine simultane Detektion der Absorption auf einer Wellenlänge, die den Verbrennungsprodukten zuzuordnen ist, erreicht werden. Durch das Erfassen dieser Störgröße unmittelbar in der Messstrecke würde die Qualität der Messergebnisse gegenüber einer Abschätzung aus den Abgasmessungen weiter gesteigert. Weiteres Verbesserungspotential liegt in der Anpassung der Spiegelanbindung, um die Wärmeableitung in den Zündkerzenkörper zu verbessern. Der relativ schnelle Verschleiß des Spiegels, insbesondere bei hohen Lastpunkten, weist darauf hin, dass dort lokal sehr hohe Temperaturen erreicht werden.

In seinem aktuellen Entwicklungsstand ist der Sensor in der Lage, wertvolle Beiträge bei der Gemischbildungsanalyse zu leisten. Insbesondere die Fähigkeit die Kraftstoffkonzentration einer großen Anzahl von Einzelzyklen kurbelwinkelaufgelöst aufzuzeichnen ermöglicht direkte Beziehungen zwischen dem λ -verlauf und integralen Messergebnissen aus der Abgas- und der Zylinderdruckanalyse herzustellen.

8 Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen

$\tilde{\nu}$	Wellenzahl	[1/cm]
Δx	Absorptionsweglänge	[m]
ν_k	Anzahl der Kraftstoffmoleküle	[mol]
ν_l	Anzahl der Luftmoleküle	[mol]
λ	Lambda (Luft-Kraftstoff-Verhältnis)	[-]
ν	Frequenz des Lichtes	[1/s]
σ	Absorptionskoeffizient	[l/mol cm]
ϕ	Kurbelwinkel	[°]
α	Wärmeübergangskoeffizient	[W/m ² K]
ω	Kreisfrequenz des Motors	[1/s]
α_k	kraftstoffkonzentrationsabhängige Größe zur Bestimmung der Kalibrierfunktion	[K/bar]
A	wärmeübertragende Brennraumfläche	[m ²]
A_{21}	Einstein-Koeffizient der spontanen Emission	[1/s]
b_{12}	stimulierte Absorptionsrate	[1/s]
B_{12}	Einstein-Koeffizient der Absorption	[m ³ /Ws ²]
b_{21}	Stimulierte Emissionsrate	[1/s]
B_{21}	Einstein-Koeffizient der stimulierten Emission	[m ³ /Ws ²]
C	Absorberkonzentration	[mol/l]
C_{gesamt}	Gesamtkraftstoffkonzentration im Brennraum	[mol/l]
c_{rest}	Restkraftstoffkonzentration im Brennraum zum Zeitpunkt der Bestimmung der Referenzintensität	[mol/l]
c_v	spezifische Wärmekapazität	[kJ/kg K]
E	Energie	[J]
g	spektrale Überlappung der Absorptionslinie mit der Anregungswellenlänge	[-]
h	Plancksches Wirkungsquantum	[Js]

H_u	unterer Heizwert	[kJ/kg]
I	gemessene Strahlungsintensität am Detektor nach passieren der Absorptionsstrecke	[V]
I_v	Strahlungsdichte des Laserenergie	[J/m ³]
I^*	Strahlungsintensität ohne Abschwächung durch Absorption	[V]
I_0	gemessene Referenzstrahlungsintensität zur Berechnung der Absorption	[V]
L	Länge der Absorptionsstrecke	[cm]
L_{st}	stöchiometrischer Luftbedarf für eine vollständige Verbrennung	[-]
m	Masse	[kg]
m_B	Kraftstoffmasse im Brennraum	[kg]
m_{k0}	gesamte Kraftstoffmasse vor Einsetzen der Verbrennung	[kg]
m_L	Luftmasse im Zylinder	[kg]
$m_{L,th}$	theoretisch benötigte Luftmasse zur vollständigen Verbrennung des Kraftstoffs	[kg]
N	Gesamtbesetzungsdichte (Gesamtanzahl Moleküle pro Volumen)	[1/cm ³]
N_1	Besetzungsdichte des unteren Zustands (Anzahl Moleküle pro Volumen im unteren Zustand)	[1/cm ³]
N_2	Besetzungsdichte des oberen Zustands (Anzahl Moleküle pro Volumen im oberen Zustand)	[1/cm ³]
p	Druck	[bar]
p_{ref}	Referenzsaugrohrdruck (zur Berechnung der bezogenen Absorption)	[mbar]
p_{sau}	Saugrohrdruck	[mbar]
Q_{21}	Quenchingrate	[1/s]
R_m	Molare Gaskonstante	[J/Kmol]
T	Gastemperatur	[K]
t_i	Ansteuerdauer des Einspritzinjektors (Einspritzdauer)	[ms]
T_w	mittlere Brennraumwandtemperatur	[K]
u_i	Spezifische thermische innere Energie	[kJ/kg]

V	Gasvolumen im Brennraum	$[m^3]$
X_v	Verhältnis von verbranntem zu nicht verbranntem Kraftstoff	$[-]$

Abkürzungen

ASB	Ansteuerbeginn der Einspritzung
ASE	Ansteuerende der Einspritzung
AV	Auslassventil
CCD	Charge-coupled device
EV	Einlassventil
$f\#$	Blendenzahl von Kameraobjektiven
FARLIF	Fuel-Air-Ration-LIF (Methode zur Bestimmung des Kraftstoffluftverhältnisses mittels LIF)
FID	Flammen-Ionisations-Detektor
FIR	fernes Infrarot (Spektrum)
FSI	Markenname von Volkswagen für Motoren mit Direkteinspritzung
HgCdTe	Quecksilber Cadmium Tellurid (IR-Detektor)
KrF [*]	Krypton-Fluorid (Excimer-Laser)
KW	Kurbelwinkel
LBK	Ladungsbewegungsklappe
LIEF	Laser-Induzierte-Exciplex-Fluoreszenz
LIF	Laser-Induzierte-Fluoreszenz
MCP	Multi-Channel-Plate (Teil eines Bildverstärkers)
MIR	mittleres Infrarot (Spektrum)
MPI	Multi-Point-Injection, Bezeichnung für die Einspritzung des Kraftstoffs in den jeweiligen Ansaugkanal des Zylinders
MVEG	Motor Vehicle Emissions Group
Nd:YAG	Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat (Laser)
NEFZ	Neuer europäischer Fahrzyklus

NIR	nahes Infrarot (Spektrum)
OT	Oberer Totpunkt (Kolbenposition im Motorzyklus)
PIV	Particle-Image-Velocimetry
TL	Teillast (Motorbetrieb)
UT	Unterer Totpunkt (Kolbenposition im Motorzyklus)
UV	Ultraviolett
VL	Volllast (Motorbetrieb)
XeCl [*]	Xenon-Clorid (Excimer-Laser)
ZZP	Zündzeitpunkt

9 Literatur

- 1 E. Pucher "Handbuch Verbrennungsmotor", Hrsg.: R. van Basshuysen, F. Schäfer, 1. Auflage, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Wiesbaden, 582-600, 2002
- 2 U. Spicher, Ch. Dahnz, K.-M. Han "Die Geschichte der Visualisierung", Hrsg.: AVL Deutschland GmbH, 8. Internationales Symposium für Verbrennungsdagnostik, 23-39, 2008
- 3 Verband der Automobilindustrie "Handeln für den Klimaschutz - CO₂ Reduktion in der Automobilindustrie", VDA-Verlag, Frankfurt, 2008
- 4 Kraftfahrtbundesamt "Statistische Mitteilungen - Neuzulassungen, Emissionen, Kraftstoffe 2006", http://www.kbashop.de/wcsstore/KBA/Attachment/Kostenlose_Produnkte/n_emissionen_kraftstoffe_2006.pdf, Flensburg, 2008
- 5 D. Hieber, H. Tschöke "Handbuch Verbrennungsmotor", Hrsg.: R. van Basshuysen, F. Schäfer, 1. Auflage, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Wiesbaden, 472-487, 2002
- 6 S. Pischinger "Verbrennungsmotoren II - Vorlesungsumdruck", Band II, 19. Auflage, trans-aix-press, Aachen, 2000
- 7 H.P. Lenz "Gemischbildung bei Ottomotoren", Springer-Verlag, Wien, 1990
- 8 B. Stiebels, M.-J. Schweizer, F. Ebus, E. Pott "Die FSI-Technologie von Volkswagen - nicht nur ein Verbrauchskonzept", Hrsg.: Haus der Technik, 5. Internationale Tagung: "Direkteinspritzung im Ottomotor", Essen, 2003
- 9 U. Spicher, J. P. Hänsche, T. Heidenreich "Ottomotor mit Direkteinspritzung", Hrsg.: R. Basshuysen, 1. Auflage, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Wiesbaden, 29-115, 2007
- 10 G. Hohenberg "Analyse der Gemischbildung und Verbrennung am DI-Ottomotor", VDI Fortschrittsberichte v. 18. Wiener Motorensymposium, 1-33, 1997
- 11 A. Koch "Handbuch Verbrennungsmotor", Hrsg.: R. van Basshuysen, F. Schäfer, 1. Auflage, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Wiesbaden, 399-406, 2002
- 12 P. Lückert, A. Waltner, E. Rau, G. Vent, U. Schaupp "Der neue V6-Ottomotor mit Direkteinspritzung von Mercedes-Benz", Motortechnische Zeitschrift, 67/11, 830-840, 2006
- 13 U. Schaupp, D. Bertsch, H. Winter, R. Schaub, W. Schmolla "Thermodynamisches Potenzial beim strahlgeführten Brennverfahren für Ottomotoren bei Mercedes-Benz", Hrsg.: Institut für Verbrennungskraftmaschinen Aachen, Institut für Kraftfahrwesen Aachen, 16. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2007, Band 2, 1. Auflage, fka Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen, Aachen, S.1109-1133, 2007
- 14 T. Tomoda, S. Sasaki, D. Sawada, A. Saito, H. Samo "Development of Direct Injection

- Gasoline Engine - Study of Stratified Mixture Formation", SAE Technical Paper 970539, 1997
- 15 K. Schintzel "Kohlenwasserstoff-Emissionen eines Motors mit Benzin-Direkteinspritzung und wandgeführtem Brennverfahren", Dissertation, Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, 73, 2005
- 16 S. Brandt, U. Dahle "Handbuch Verbrennungsmotor", Hrsg.: R. van Basshuysen, F. Schäfer, 1. Auflage, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Wiesbaden, 608-617, 2002
- 17 J. Kuder, T. Kruse "Parameteroptimierung an Ottomotoren mit Benzindirekteinspritzung", Motortechnische Zeitschrift (MTZ), 61/6, 378-384, 2001
- 18 H. Eichlseder, E. Baumann, P. Müller, S. Neugebauer "Chancen und Risiken von Ottomotoren mit Direkteinspritzung", Motortechnische Zeitschrift (MTZ), 61/3, 144-152, 2000
- 19 A. Nishiyama, N. Kawahara, E. Tomita, M. Fujiwara, N. Ishikawa, K. Kamei, K. Nagashima "In-Situ Fuel Concentration Measurement Near Spark Plug by 3.392 μm Infrared Absorption Method-Application to a Port Injected Lean-Burn Engine", SAE Technical Paper 2004-01-1353, 2004
- 20 J. B. Heywood "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw-Hill Book, Inc., New York, 1988
- 21 M. Berckmüller, N.P. Tait, D.A. Greenhalgh "The Influence of Local Fuel Concentration on Cyclic Variability of a Lean Burn Stratified-Charge Engine", SAE Technical Paper 970826, 1997
- 22 T. Ayusawa, T. Nemoto, Y. Koo, S. H. Jo "Relationship Between Local Air-Fuel Ratio and Combustion Character in Spark Ignition Engines", SAE Technical Paper 780147, 1978
- 23 K. Matsui, T. Tanaka, S. Ohigashi "Measurement of Local Mixture Strength at Spark Gap of S.I. Engines", SAE Technical Paper 790483, 1979
- 24 A. Kölmel, U. Spicher, R. Düsterwald, F. M. Wytrykus "Analysis of Mixture Distribution and Mixture Formation Using a Fast Gas Sampling Valve", SAE Technical Paper 982473, 1998
- 25 A. Witt, W. Kern "Methods for Assessing the Mixture Quality Local to the Ignition Site in DI Gasoline Engines", Proceedings 6th International Symposium on Internal Combustion Diagnostics, 175-187, Baden-Baden, 2004
- 26 W. K. Cheng, F. Galliot, N. Collings "On the Time Delay in Continuous In-Cylinder Sampling from IC Engines", SAE Technical Paper 890579, 1989
- 27 G. Suck "Untersuchung der HC-Quellen an einem Ottomotor mit Direkteinspritzung", Dis-

-
- sertation, Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, 2001
- 28 R. Reinmann, A. Saitzkoff, F. Mauss "Local Air-Fuel Ratio Measurements Using the Spark Plug as an Ionization Sensor", SAE Technical Paper 970856, 1997
 - 29 J. Fischer, A. Velji, U. Spicher, F. Zimmermann, C. Schulz "Measurement of the Equivalence Ratio in the Spark Gap Region of a Gasoline Direct Injection Engine with Spark Emission Spectroscopy and Tracer-LIF", SAE Technical Paper 2004-01-1916, 2004
 - 30 A. C. Eckbreth "Laser Diagnostics for Combustion Temperature and Species (2nd Edition)", Gordon and Breach Publication, Amsterdam, 1996
 - 31 H. Zhao, N. Ladommatos "Engine Combustion Instrumentation and Diagnostics", Society of Automotive Engineers, Warrendale, 2001
 - 32 V. Beuhausen, O. Thiele, T. Berg, H. Voges, T. Müller, F. Kallmeyer, W. Hentschel, R. Greszik, J. Raimann, S. Arndt "Crank-Angle Resolved Determination of Fuel Concentration and Air/Fuel-Ratio Inside a Direct Injection SI Production Engine Under Real-Fuel Conditions", Tagungsband „Motorische Verbrennung, Aktuelle Probleme und moderne Lösungsansätze (VII. Tagung)“, Haus der Technik, München 15./16. März, 187-198, 2005
 - 33 R. Reichle, C. Pruss, W. Osten, H. J. Tiziani, F. Zimmermann, C. Schulz „Acquisition of combustion parameters close to the ignition spark with a fiber-optic sensor“, Hrsg.: W. Osten, C. Gorecki, E. L. Novak, "Optical measurement systems for industrial inspection IV", Band Volume 5856, SPIE-The International Society for Optical Engineering, 158-168, 2005
 - 34 M. H. Koenig, M. J. Hall "Measurements of Local In-Cylinder Fuel Concentration Fluctuations in a Firing SI Engine", SAE Technical Paper 971644, 1997
 - 35 M. H. Koenig, M. J. Hall "Cycle-Resolved Measurements of Pre-Combustion Fuel Concentration Near the Spark Plug in a Gasoline SI Engine", SAE Technical Paper 981053, 1998
 - 36 T. Berg, H. Voges, O. Thiele, V. Beuhausen, W. Hentschel, F. Kallmeyer "Optical Sensors for Automotive Engine-Research Applications", 4th IEEE Sensors, Irvine, 2005
 - 37 A.C. Eckbreth "Laser Diagnostics for Combustion Temperature and Species", Hrsg.: A.K. Gupta, D.G. Lilley, Energy and Engineering Science Series, Volume 7, Abacus Press, Cambridge, 1988
 - 38 H. Günzler, H.-U. Gremlich "IR-Spektroskopie", 4. Auflage, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2003
 - 39 G. Herzberg "Molecular Spectra and Molecular Structure, Band I, Spectra of Diatomic Molecules", Krieger Publishing Company, 1989
 - 40 O. Thiele "Faseroptische Gemischbildungsanalyse in Otto-Motoren bei direkteinspritzen-

- den Brennverfahren", Cuvillier Verlag Göttingen, Dissertation, Göttingen, 2004
- 41 A. E. Klingbeil "Mid-IR Laser Absorption Diagnostics for Hydrocarbon Vapor Sensing in Harsh Environments", Dissertation, Stanford University, 2008
- 42 J. Meyer, W. Graul, K. Kiefer, J. Thiemann "Study and Visualization of the Fuel Distribution in a Stratified Spark Ignition Engine with EGR Using Laser-Induced Fluorescence", SAE Technical Paper 970868, 1997
- 43 C. Schulz, V. Sick "Tracer-LIF diagnostics: Quantitative measurement of fuel concentration, temperature and air/fuel ratio in practical combustion situations", *Progress in Energy and Combustion Science*, 31, 75-121, 2005
- 44 J.C. Swindal, D. P. Dragonetti, R. T. Hahn, P. A. Furmann, W. P. Acker "In-Cylinder Charge Homogeneity During Cold Start Studied with Fluorescent Tracers Simulating Different Fuel Distillation Temperatures", SAE Technical Paper 950106, 1995
- 45 S. Einecke, C. Schulz, V. Sick "Measurement of temperature, fuel concentration and equivalence ratio", *Applied Physics B*, 71, 717-723, 2000
- 46 M. Thurber, R. K. Hanson "Pressure and Composition dependence of acetone laser-induced fluorescence with excitation at 248, 266 and 308 nm", *Applied Physics B, Volume 69*, 229-240, 1999
- 47 W. Koban, J.D. Koch, V. Sick, N. Wermuth, R.K. Hanson, C. Schulz "Predicting LIF signal strength for toluene and 3-pentanone under engine-related temperature and pressure conditions", *Proceedings of the Combustion Institute*, Volume 30, 1545-1553, 2005
- 48 J. Reboux, D. Puechberty, F. Dionnet "A new approach of planar laser induced fluorescence applied to fuel/air ratio measurement in the compression stroke of an optical spark ignition engine", SAE Technical Paper 941988, 1994
- 49 W. Koban, J. D. Kock, R. K. Hanson, C. Schulz "Oxygen quenching of Toluene fluorescence at elevated temperatures", *Applied Physics B*, 80, 777-784, 2005
- 50 J. Scholz, T. Wiersbinski, V. Beushausen "Planar Fuel-Air-Ratio-LIF with Gasoline for Dynamic Mixture-Formation Investigations", SAE Technical Paper 2007-01-0645, 2007
- 51 P. Wieske, S. Wissel, G. Gruenefeld, M. Graf "Experimental investigation of the origin of cyclic fluctuations in a DISI engine by means of advanced Laser Induced Fluorescence measurements", SAE-Technical Paper 2006-01-3378, 2006
- 52 F. P. Zimmermann "Neue Ansätze zur optischen und mikrooptischen Diagnostik in Verbrennungsmotoren", Dissertation, Heidelberg, 2006
- 53 C. Kornmesser "Möglichkeiten und Grenzen planarer Lasermeßtechniken zur Analyse der Gemischbildung bei direkteinspritzenden Brennverfahren", Cuvillier, Dissertation, Göttingen, 2001

-
- 54 V. Sick, C. Fajardo "Development and Application of High-Speed Imaging Diagnostics for Spray-Guided Spark- Ignition Direct-Injection Engines", Hrsg.: AVL, Beitrage - 8. Internationales Symposium für Verbrennungsdiagnostik, 391-399, 2008
- 55 AVL LIST GmbH "Single Cylinder Research Engine - Technical Data Sheet", Graz, 2008
- 56 M. Richter, B. Axelsson, M. Aldén "Engine Diagnostics Using Laser Induced Fluorescence Signals Collected Through an Endoscopic Detection System", SAE Technical Paper 982465, 1998
- 57 R. Reichle, C. Pruss, W. Osten, H.J. Tiziani, F. Zimmermann, C. Schulz "Hybrid excitation and imaging optics for minimal invasive multiple-band UV-LIF-measurements in engines", VDI-Berichte 1959, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 223-235, 2006
- 58 LaVision "Product Manual, UV Camera Endoscope", Göttingen, 2004
- 59 LaVision "FlameStar 2 (F) Operation Manual", Göttingen, 1998
- 60 G. Ohmstede, S. Schmerbeck, F. Lange, L. Kapitza, G. Block, P. Alberti "Untersuchung von Eigenschaften alternativer Kraftstoffe für die dieselmotorische Verbrennung", Hrsg.: AVL, 8. Internationales Symposium für Verbrennungsdiagnostik, 285-296, 2008
- 61 U. Brackmann "Lambdachrome Laser Dyes", 3. Auflage, Lambda Physik, Göttingen, 2000
- 62 I. Düwel, J. Schorr, J. Wolfrum, C. Schulz "Laser-induced fluorescence of tracers dissolved in evaporating droplets", Applied Physics B, 78, 127-131, 2004
- 63 M.-J. Hall, M. Koenig "A fiber-optic probe to measure precombustion in-cylinder fuel-air ratio fluctuations in production engines", Proceedings of the Combustion Institute, Volume 26, 2613-2618, 1996
- 64 A. Nishiyama, N. Kawahara, E. Tomita "In-Situ Fuel Concentration Measurement Near Spark Plug by 3.392 μm Infrared Absorption Method-Application to Spark Ignition Engine", SAE Technical Paper 2003-01-1109, 2003
- 65 A. Lamprecht, T. Beyer, M. Braun, A. Peter, S. Hartwig "Schnelle Gasspektroskopie mit gepulsten Quantenkaskadenlasern für die Luftgütemessung", Technisches Messen, 71. Jahrgang, 5, 314-315, 2004
- 66 U. Spicher, T. Heidenreich "Ottomotor mit Direkteinspritzung", Hrsg.: R. Basshuysen, 1. Auflage, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Wiesbaden, 213-242, 2007
- 67 P.-W. Manz "Indizieretechnik an Verbrennungsmotoren", Vorlesungsskript TU Braunschweig, Braunschweig, 2005
- 68 S. Pischinger "Verbrennungsmotoren I - Vorlesungsumdruck", Band I, 21. Auflage, trans-aix-press, Aachen, 2000
- 69 B. Block "LIF Untersuchungen am Transparentmotor", persönliche Mitteilung, Volks-

wagen AG, Wolfsburg, 2005

- 70 N. Kawahara, E. Tomita, A. Nishiyama, K. Hayashi "In-Situ Fuel Concentration Measurement near Spark Plug by 3.392 μm Infrared Absorption Method - Pressure and Temperature Dependence of the Gasoline Molar Absorption Coefficient", SAE Technical Paper 2006-01-0182, 2006
- 71 J.D. Smith, V. Sick "Crank-Angle Resolved Imaging of Fuel Distribution, Ignition and Combustion in a Direct-Injection Spark-Ignition Engine", SAE Technical Paper 2005-01-3753, 2005
- 72 Schott AG, "Optische Glasfilter - Datenblatt", Mainz, 2004

10 Anhang

Filterkurven

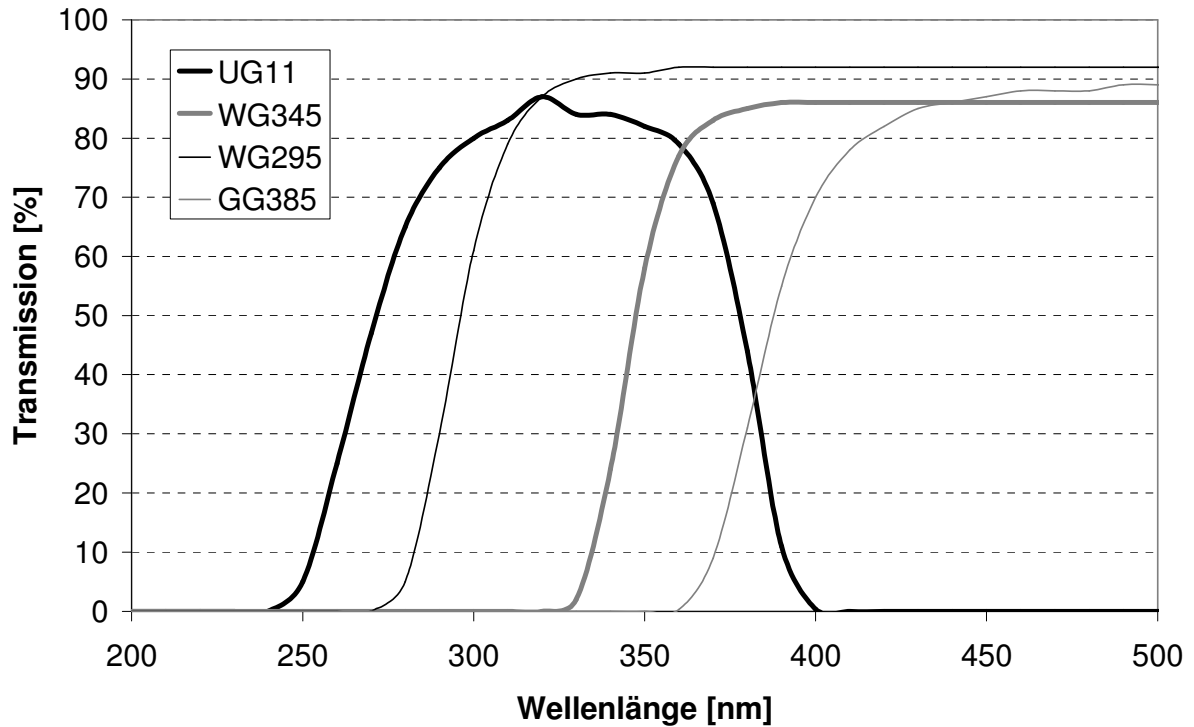


Abbildung 10.1: Schott Glasfilter Transmissionskurven, UG11, WG295, WG345, GG385 [72]

Berechnung der Kraftstoffkonzentration

Die Berechnung der C_3H_8 -equivalenten Kraftstoffkonzentration in Abhängigkeit von Lambda lässt sich wie folgt herleiten:

Mit den Molmassen für Luft und Brennstoff M_L und $M_{C_3H_8}$ sowie den Stoffmengen n_L und $n_{C_3H_8}$ lässt sich Lambda gemäß Gleichung A1 berechnen.

$$\lambda = \frac{m_L}{m_{L,stöch}} = \frac{m_L}{m_{C_3H_8} \cdot L_{st}} = \frac{n_L \cdot M_L}{n_{C_3H_8} \cdot M_{C_3H_8} \cdot L_{st}} \quad (A1)$$

Umgestellt ergibt sich daraus:

$$n_{C_3H_8} = \frac{n_L \cdot M_L}{\lambda \cdot M_{C_3H_8} \cdot L_{st}} \quad (A2)$$

Durch Einsetzen von Gleichung A2 und A3

$$n_{ges} = n_{C_3H_8} + n_L \quad (A3)$$

in Gleichung A4

$$c_B = \frac{n_{C_3H_8}}{n_{ges}} \quad (A4)$$

erhält man folgendes Ergebnis:

$$c_{C_3H_8} = 10^6 \frac{M_L}{\lambda \cdot M_{C_3H_8} \cdot L_{st} + M_L} \quad (A5)$$

Mit: $M_L = 28,9644 \text{ g/mol}$, $M_{C_3H_8} = 44,094 \text{ g/mol}$, $L_{st} = 14,06$ ergibt sich für $\lambda = 1,0$ somit eine C_3H_8 -equivalente Kraftstoffkonzentration von:

$$c_{C_3H_8} = 44634 \text{ ppm}$$

Verwendete Gasanalysatoren am Motorprüfstand:

HC	Flammenionisationsdetektor (FID) FID 2000 MP Fa. TESTA Messbereiche: 0 .. 300, 300 .. 1000, 1000 .. 3000 ppm Absoluter Fehler $\leq 1\%$
CO	Infrarot-Gasanalysator (NDIR) Ultramat 5E Fa. Siemens Messbereich: 0 .. 1, 1 .. 3, 3..10% Absoluter Fehler $\leq 2\%$
CO ₂	Infrarot-Gasanalysator (NDIR) Ultramat 5E Fa. Siemens Messbereiche: 0 .. 1, 1 .. 3, 3 .. 10, 10 .. 16% Absoluter Fehler $\leq 2\%$
NO/ NO ₂	Infrarot-Gasanalysator (NDIR) Ultramat 5E Fa. Siemens Messbereiche: 0 .. 500, 500 .. 1000, 1000 .. 2500, 2500 .. 5000 ppm Absoluter Fehler $\leq 2\%$ in Kombination mit einem NO-Konverter
O ₂	Paramagnetischer Sauerstoffanalysator Oximat 5E Fa. Siemens Messbereiche: 0 .. 2, 2 .. 5, 5 .. 10, 10 .. 25% Absoluter Fehler $\leq 2,5\%$

Lebenslauf

Persönliche Angaben

Nachname: Kallmeyer
Vorname: Felix
Geburtstag: 21.03.77 in Kiel
Familienstand: verheiratet
Staatsangehörigkeit: deutsch

Schulbildung

08/83 – 07/87 Grundschohle Burgaltendorf, Essen
09/87 – 09/93 Carl-Humann-Gymnasium Essen-Steele
09/93 – 06/94 Titusville High-School, Florida, USA,
Abschluss: „High-School-Diploma“
09/94 – 06/96 Carl-Humann-Gymnasium Essen-Steele
Abschluss: Allgemeine Hochschulreife

Wehrdienst:

10/96 – 07/97 Grundwehrdienst, Marine

Studium:

10/97 – 09/02 Studium des Maschinenbaus an der RWTH-Aachen
08/99 Abschluss: Diplomvorprüfung
09/02 Abschluss: Diplom-Ingenieur